한국기계가공학회지, 제14권, 제3호, pp.124~130(2015.6) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers,Vol.14 No.3, pp.124~130(2015.6) ISSN 2288-0771(Online)

http://dx/doi.org/10.14775/ksmpe.2015.14.3.124

마이크로 딤플 패턴에 따른 마찰특성에 관한 연구

황남성*,#
*영남이공대학교 기계계열

A Study on Friction Characteristics According to Micro-dimple Patterns

Nam-Seong Hwang*,#
*Dept. of Mechanical Engineering, Yeungnam University College
(Received 6 May 2015; received in revised form 27 May 2015; accepted 29 May 2015)

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate friction characteristics according to micro-dimple patterns. The surface texturing of micro-dimple patterns was tested to examine the friction of pin-on-disk using flat-on-flat contact geometry. The patterns of both dimple circle and groove pattern were adopted to carry out the effect of those ones. In the low loads, such as 13.8N and 27.7N, the friction coefficients of groove pattern were lower than those of dimple circle pattern. In many other comparisons of normal loads, the groove pattern had lower friction forces, which showed the effect of surface texturing. The relationship between sliding time and friction forces showed that the increase of friction forces of groove pattern were relatively lower than those of dimple pattern.

In conclusion, the dimple patterns of dimple-circle pattern and groove pattern strongly contributed to reducing the friction between contacting materials.

Key Words : Pin-on-disk(핀-온-디스크),Micro Dimple Pattern(마이크로 딤플 패턴),Dimple-circle Pattern(원 딤플 형),Groove Pattern(그루브 형),Surface Texturing(표면 텍스츄링)

1. 서 론

자동차산업에 있어 엔진의 마찰 손실은 40 % 정도 되는 것으로 보고 되고 있다.[1] 이러한 마찰 손실을 줄이기 위해 엔진부의 실린더 라이너와 피스톤 링의 표면에 마이크로 크기의 딤플을 가공하여 미끄럼마찰 특성을 제고시키는 연구가 진행되고 있다.

Corresponding Author : tophns@naver.com
Tel: +82-53-650-9216, Fax: +82-53-625-0861

Surface texturing을 활용한 표면개질연구가 활발히 진행되고 있으며, Surface texturing은 상대운동을 하는 두 표면 사이에 윤활특성을 개선할 목적으로 두 표면 중 적어도 한 표면에 마이크로 딤플이나 그루브 등의 요철을 다수 가공하는 것을 말하는데 표면의 요철은 마모입자, Trapping, 윤활제 저장, Hydrodynamic 압력발생 기능을 통해 마찰력의 저감 효과를 가져오고 있다.[2]

Hamilton 등은 미세구멍이 미세 동압 베어링 역할을 할 수 있음을 보였다.[3] 이는 미케니컬 시일

과 같이 두 면이 거의 평행하게 상대운동을 하여 동압효과가 미미한 경우 효과가 아주 극대화 된다는 특징을 가지고 있다.[4,5]

Kato 등은 SiC 등을 대상으로 Surface texturing의 깊이/지름의 비, 밀도, 깊이에 대하여 간단한 이론적 접근과 실험적인 연구를 통해 펌프의 체적을 75 % 줄이면서 효율은 2배 제고시키는 물 펌프를 제작하였다.[6] 그는 surface texturing의 미케니즘을 Hydrodynamic effect와 Storage effect로 나누어 해석하였다.[7]

이러한 학문적인 연구와 실제적인 연구가 진행되어 왔지만 많은 연구결과가 산업현장에 접목 되는데 시간이 걸리고 있다. 이는 이를 적용하여 실제적인 연구[8,9]가 미약하기 때문이라는 분석을 통해 연구나 실험데이터를 현장을 접목시키는 노력의 일환으로 딤플 패턴과 그루브 형의 패턴을 동일 조건에서 비교분석한 결과를 토대로 어떤 설계에는 어떤 패턴을 채용하는 것이 유리할 것인지를 확인하는 연구를 진행하여 앞으로 설계에 surface texturing이 적용되기를 기대한다.

따라서 본 연구에서는 마이크로 딤플 패턴과 그루브 형 패턴을 활용하여 마찰실험을 실시하여 마찰특성을 연구하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험

2.1 실험방법

본 연구에서 표면 texturing 효과를 검증하기 위해 Fig. 1과 같은 Pin-on disk를 사용하여 다양한 조건 하에서 실험과 마찰계수를 측정하였고, 다양한 조건에 따라 Surface texturing에 대한 실험을 수행하였다.

Fig. 1은 핀-온-디스크 실험장치의 개략도이며 디스크 시편을 타이밍 벨트를 통해 모터로 회전시켜 핀과 상대운동을 일으키며 시편 위에 추를 이용하여 시편 간에 하중을 가하고 핀 시험편을 잡고 있는 바의 디스크 방향을 로드 셀로 구속하면서 마찰력을 측정하였다.

2.2 시험편

본 연구에 활용된 시험편은 Table 1과 같다. 핀 시험편과 디스크 시험편 모두 베어링강을 사용하였으며, 핀 시험편의 직경은 6 mm, 디스크 시험편의 직경은 40 mm이다. Surface texturing의 효과를 입증하기 위해 디스크 시험편과 접촉하는 핀 시험편의 마찰 면에 미세한 딤플을 가공하였다. 이 가공을 위해 Photolitho graphy 기법을 활용하여 화학적 에칭으로 원하는 미세 딤플을 가공하였다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 딤플의 패턴을 나타낸다. 육각배열로 딤플을 배열하였으며 이 딤플 밀도, 피치 등은 그림과 같이 계산할 수 있다.

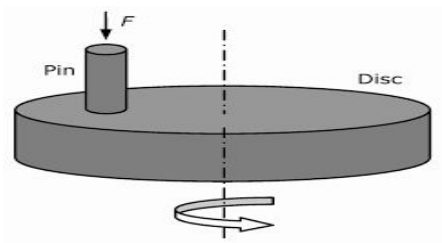


Fig. 1 Principle of pin-on-disk experiment

Table 1 Experimental conditions

Parameters	Conditions
Disk Material	Bearing metal
Pin material	Bearing metal
Pin Dia.	6 mm
Disk Dia.	40 mm

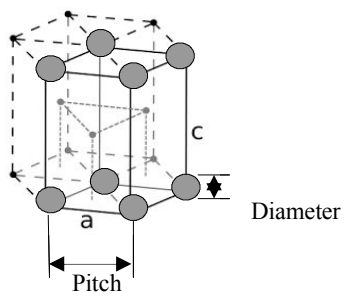
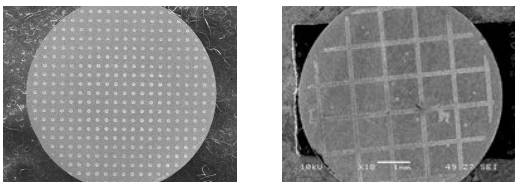


Fig. 2 Hexagonal array



(a) dimple-circle-10 % (b) groove

Fig. 3 Two types of specimen

Table 2 Surface groove texturing

Diameter ㎛	Density %	Pitch ㎛	Depth ㎛
100	10, 20	301	4~5

여기서 딤플밀도는 전체 핀에서 딤플이 제작된 면적이 차지하는 비율을 나타내며, 피치는 한 딤플에서 가장 인접한 딤플의 중심까지의 거리를 의미한다. 피치는 Table 2에 나타내었고 직경은 100 ㎛ 밀도는 10 % 깊이는 4~5 ㎛으로 가공하였다.

Area of density, ρ_A

$$\rho_A = \frac{\pi}{2\sqrt{3}}\left[\frac{d}{p}\right]^2 100$$

Pitch, p

$$p = d\sqrt{\left[\frac{1}{\rho_A}\right]\frac{\pi}{2\sqrt{3}}}$$

Diameter, d

Fig. 3은 딤플패턴이 가공된 시험편을 SEM으로 촬영한 것으로서 직경 100 ㎛ 딤플이 10 % 혹은 20 % 밀도로 가공하였다.

2.3 실험방법

본 실험에서 사용한 실험조건은 Table 3과 같다. 시험편 간의 면압은 13.8~92.0 N이며, 디스크 회전속도는 9.6~143.3 rpm이다. 실험은 하중별로 이루어 졌으며 하나의 하중 조건에서 회전속도를 변해 가면서 실험을 수행한 후 실험값을 추출하였다.

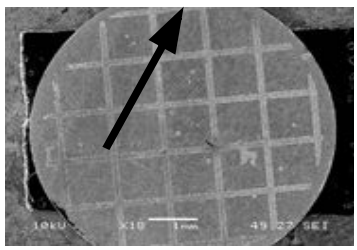


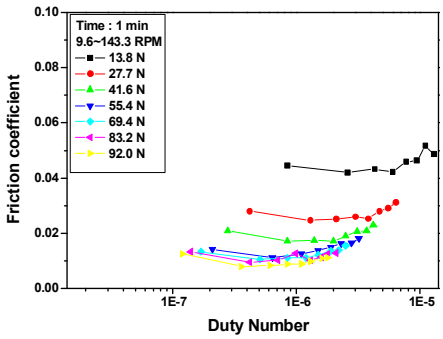
Fig. 4 Sliding direction on surface in friction tests

Fig. 4는 마찰실험을 실시할 때 딤플의 미끄럼 방향을 나타낸다. 이러한 미끄럼 방향도 마찰력에 영향을 줄 수 있을 것이다.

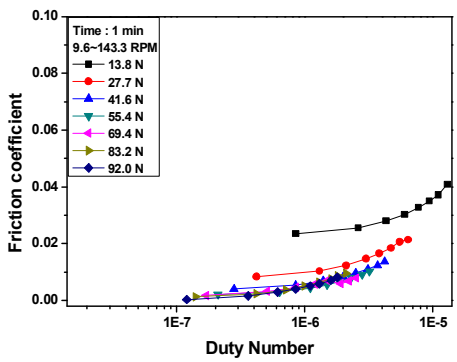
3. 실험결과

3.1 Surface texturing과 마찰계수

Fig. 5는 본 연구에서 활용하고 있는 세 가지 시험편에 대해 실험한 후 마찰계수를 비교한 그래프이다. Fig. 4 (a)는 100 ㎛의 딤플을 10 %의 밀도로 가공한 시험편의 실험결과로서 역시 다양한 하중과 속도에 대해 마찰력을 측정한 후 Duty number와 마찰계수와의 관계를 나타낸 것이다. (b)는 그루브 형의 surface texturing을 가진 시험편에 대해 동일한 실험조건으로 실험한 후 Duty Number와 마찰계수와의 관계를 나타낸 그래프로서 surface texturing을 하지 않은 것과는 차이가 있었고 동일한 하중인 13.8 N에서도 딤플의 경우에는 마찰계수가 0.05를 나타낸 반면 그루브 형의 경우에는 0.03을 나타내었다. 일반적으로 10^{-7}~10^{-6} 부근에서는 마찰계수가 작아지나 10^{-5}에서는 마찰계수의 감소효과가 사라지는 것이 일반적인 특징인데 Fig. 5의 딤플패턴의 경우에서는 저하중인 13.8 N과 27.7 N에서 마찰계수가 0.05 및 0.03을 나타내어 마찰계수가 큼을 알 수 있다. 이는 저 하중 영역에서는 딤플 패턴보다 그루브 형 패

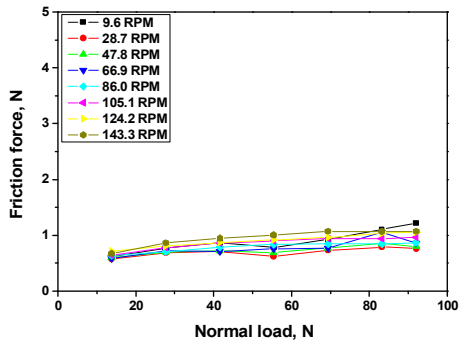


(a) dimple-circle-10 %

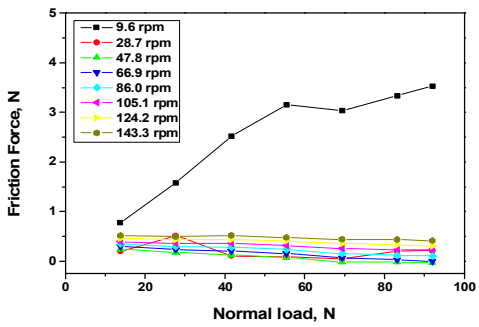


(b) groove

Fig. 5 Comparison of duty number



(a) dimple-circle-10 %



(b) groove

Fig. 6 Relationship between normal load and friction force

턴이 마찰력을 감소시킨다는 것을 의미한다.

이는 윤활제와 Hydrodynamic 압력발생 등에 기인한다고 사료된다.

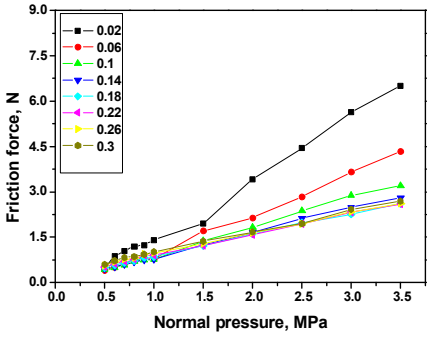
3.2 수직하중과 마찰력과의 관계

Fig. 6은 수직하중과 마찰력과의 관계를 나타낸 그래프이다. (a)는 딤플을 가진 경우인데 수직하중이 증가 할수록 마찰력이 증가하는 경향을 나타내었다. 즉 수직하중이 12 N일 때 마찰력은 0.6 N이었고 수직하중이 92 N일 때 9.6 rpm의 경우에 마찰력이 1.2 N으로서 가장 큼을 알 수 있다. (b)는 그루브형의 surface texturing을 가진 경우인데 하중이 12 N일 때 마찰력은 0.3 N을 나타내다가 수직하중이 92 N일 때 마찰력이 거의 0 N에 도달하고 있음을 확인할 수 있었다.

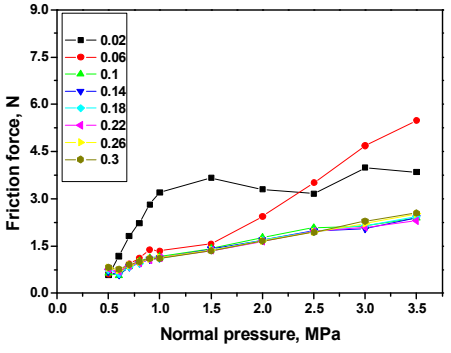
위 그래프를 통해 그루브 형의 surface texturing의 경우가 고속의 경우에는 마찰력을 거의 0 N에 가깝게 감소시키는 것을 알 수 있었다. 다만 9.6 rpm의 경우, 수직하중이 92 N일 경우 마찰력이 3.5 N을 나타내어 회전수가 낮은 경우 마찰력이 증가함을 보여 회전수에 따라 Surface texturing의 영향이 상이한 특징을 나타내었다.

3.3 수직압력과 마찰력과의 관계

Fig. 7은 수직압력과 마찰력과의 관계를 나타낸 그래프이다. 이 때 시험편의 밀도는 20 %로 제작된 것을 사용하였으며 수직압력이 커질수록 마찰력은 커지는 경향을 나타나는 부분은 동일하지만 속도가 0.02 m/sec이고 (a)의 딤플패턴의 경우, 수직압력이 0.5 MPa에서 1.5 MPa까지의 경우 마찰력은 0.7 N에서 최대 4.0 N까지 급격하게 570 % 증가함을 볼 수 있다. (b) 그루브형의 경우에는 동일한 조건에서 비교해 보면 수직압력이 0.5 MPa에서 1.5 MPa까지의 경우 마찰력은 0.3 N에서 1.9 N까지 급격하게 633 % 증가함을 볼 수 있다.



(a) dimple-circle-10 %



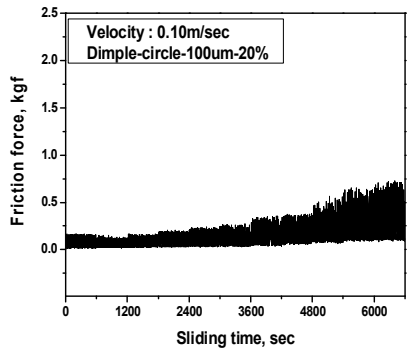
(b) groove

Fig. 7 Relationship between normal pressure and friction forces

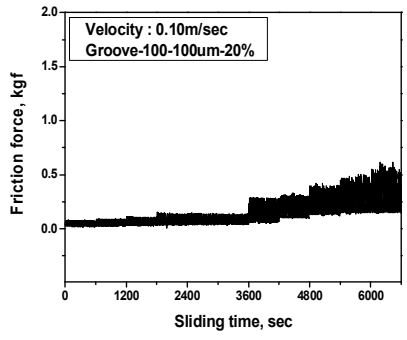
이 두 경우를 살펴보면 딤플 패턴의 경우가 수직압력이 1.5 MPa일 때 마찰력이 4.0 N으로서 1.9 N인 그루브 형보다 마찰력이 2.1배 더 큼을 알 수 있다. 이러한 동일한 수직압력과 비교를 통해 딤플 패턴보다 그루브형 패턴이 훨씬 더 마찰력이 작음을 알 수 있다.

3.4 미끄럼 시간과 마찰력

Fig. 8은 속도 0.1 m/sec에서 미끄럼시간과 마찰력과의 관계를 나타낸 그래프로서 (a) 딤플 패턴의 경우 1시간이 경과한 후 마찰력이 서서히 증가하여 0.24 kgf가 되고 (b)의 그루브 형의 경우는



(a) dimple-circle-10 %



(b) groove

Fig. 8 Relation between sliding time and friction force

1시간이 경과한 후 마찰력은 급격히 증가하여 0.26 kgf을 나타내었다.

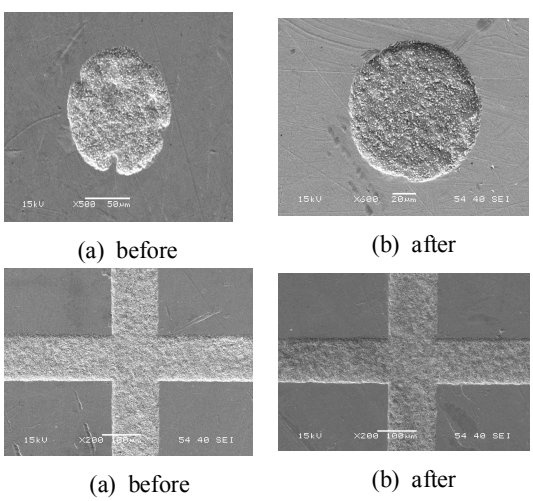
시간의 경과에 따른 마찰력의 증가는 두 가지 surface texturing에서 유사성을 가지고 있으나 그루브 형의 경우에 마찰력의 증가가 상대적으로 낮음을 알 수 있었다.

따라서 사용하는 빈도와 사용하는 곳에 따라 surface texturing의 형상을 달리하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

3.5 패턴에 따른 실험 전과 후의 접촉면 비교

Fig. 9는 딤플 패턴과 그루브 형의 실험 전과 후의 접촉면의 변화를 SEM으로 촬영하여 비교한 것이다. (a)는 딤플 패턴의 실험 전 후의 변화를 촬영한 것이고, (b)는 그루브 형의 실험 전 후의 변화를 촬영한 사진이다.

SEM사진에서 보는 바와 같이 실험 전후에 접촉면에 큰 변화는 발견되지 않는다. 이는 Surface texturing에 의한 접촉 표면 간의 돌기에 의해서 압력변화를 일으키게 되고 특정 조건에서는 캐비테이션 현상이 발생되어 돌기 전후에 압력의 불균형이 발생되어 상대접촉하는 표면을 분리시켜 마찰력의 감소를 가져온다고 사료된다.



(a) before (b) after

(a) before (b) after

Fig. 9 Photography of SEM for dimple-circle pattern and groove one before and after experiments

따라서 향후의 연구는 Surface texturing에 대한 상대적 비교를 통한 적용을 높이고 이를 데이터베이스화 하여 설계 자료로 활용할 수 있기를 바란다.

4. 결 론

본 연구에서는 마찰 저감을 위해 활발히 연구 중인 surface texturing 중에서 딤플패턴과 그루브 형에 대해서 마찰특성에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 다양한 하중과 속도로 마찰실험을 한 결과 저하중인 13.8 N과 27.7 N에서는 마찰계수가 0.05 및 0.03을 나타내어 딤플 패턴보다 그루브 형 패턴이 마찰력을 감소시킨다는 것을 확인하였다.

2. 동일한 수직압력과 비교를 통해 100 ㎛ circle 딤플 패턴보다 그루브형 패턴이 훨씬 더 마찰력이 작았으며 Surface texturing의 효과가 큼을 알 수 있었다.

3. 수직압력이 커질수록 마찰력은 커지는 경향을 나타내었고, 수직압력이 1.5 MPa일 때 딤플 패턴의 경우가 그루브 형보다 마찰력이 2.1배 더 크다는 것을 알 수 있었다.

4. 미끄럼시간과 마찰력을 비교하여 보면 시간의 경과에 따른 마찰력의 증가는 두 가지 surface texturing에서 유사성을 가지고 있으나 그루브 형의 경우에 마찰력의 증가가 상대적으로 낮음을 알 수 있었다.

후 기

“이 논문은 2013학년도 영남이공대학교 연구조성비 지원에 의한 것임.”

REFERENCES

1. Nakada, N.,“Trends in Engine Technology and Tribology”, Tribology and International, Vol. 27, No.1, pp.3~8, 1994.
2. Kim, S. G., Song, K. C., Kim, S. B., and Chae, Y. H., “Effect of Surface Texturing under Grease Lubrication”, Journal of the KSTLE Vol. 24, No. 5, 2008.
3. Hamilton, D. B., Walowit, J. A., and Allen, C. M., “A Theory of Lubrication by Microasperities”, Journal of Basic Engineering, Vol. 88, No. 1, pp.177~185, 1966.
4. Anno, J. N., Walowit, J. A., and Allen, C. M., “Microasperity Lubrication”, ASME Journal of Lubrication of Technology, Vol. 90, No. 2, pp. 351~355, 1968.
5. Anno, J. N., Walowit, J. A., and Allen, C. M., “Load Support and Leakage from Microasperity-Lubricated Face Seals“, ASME Journal of Lubrication of Technology, Vol. 91, No. 4, pp. 726~731, 1969.
6. Wang, X., Kato, K., and Aizawa, K., “Loads Carrying Capacity Map for the Surface Texture Design of SiC Thrust Bearing Sliding in Water”, Tribology International, Vol. 36, No. 3, pp. 189~197, 2003.
7. Wang, X., Kato, 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, No. 10, pp. 703~711, 2001.
8. Park, S. H., Yoo, H. M., and Lee, W. I., “Numerical Analysis of Micro-pattern Filling with Gas Dissolution by Injection Molding Process”, Journal of KSMPE, Vol. 13, No. 4, pp.21~27, 2014.
9. Kwon, H. H.,“Manufacturing on the Door Built-in Pattern using Electroforming with Hologram”, Journal of KSMPE, Vol. 14, No. 1, pp.15~20, 2015.