

유체윤활영역에서 패턴의 모양비율에 따른 마찰 저감효과

이대훈*, 박상신*, 고태조*[#], 심재술*[#]

*영남대학교 기계공학과

Effect of the Texture Shape Aspect Ratio on Friction Reduction in a Hydrodynamic Lubrication Regime

Daehun Lee*, Sang-Shin Park*, Tae Jo Ko*[#], Jaesool Shim*[#]

*School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

(Received 1 March 2017; accepted 13 March 2017)

ABSTRACT

Friction occurs when surfaces that are in contact move relatively between solid surfaces, fluid layers, and materials slide against one another. This friction force causes wear on the contact surface, generates unwanted heat and leads to performance degradation. Thus, much research has been performed to avoid friction reduction. Among these studies, a textured surface that has micro patterns on the surface has drawn attention for its ability to reduce friction. A mathematical model is developed in this study to examine friction reduction due to the texture of a surface. Numerical simulations are carried out with respect to various factors such as the shape aspect ratio and texture depth of a diamond-shaped texture in the hydrodynamic lubrication regime. As a result, a shape aspect ratio of 1 is best for friction reduction.

Key Words : Shape Aspect Ratio(세장비), Texture Depth(패턴 깊이), Hydrodynamic Lubrication(유체윤활)

1. 서 론

기계가 운동할 때 마찰은 항상 발생하게 된다. 이 마찰은 기계 표면의 마모와 기계의 운동을 방해하는 마찰력으로 인해 기계의 성능에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 많은 연구자들은 두 물체 사이의 마찰력 및 마찰계수를 줄이기 위한 연구를 진행했다. 그 중 마찰이 발생하는 표면에 특정한

패턴을 가공하여 마찰력 및 마찰계수를 줄이는 방법을 표면조각(surface texturing)이라고 한다.

표면에 패턴이 가공되면 유체압력을 상승시키고 부하용량을 증가시켜주는 역할뿐만 아니라^[1], 마찰력을 크게 상승시키는 마모된 파편을 저장 하는 효과^[2], 윤활유를 저장하는 장점까지 있다^[3,4].

패턴의 효율을 결정하는 요소들은 패턴이 차지하는 면적 비, 패턴의 깊이와 패턴의 직경 비, 패턴의 모양이 대표적이다. 이 중에서 패턴이 차지하는 면적 비는 윤활영역에 따라 크게 달라진다. 고체윤활영역에서는 면적비가 약 12%인 경우 마찰계수가 가장 많이 줄어들고^[5], 유체윤활영역에서는 약

Corresponding Author : tjko@yu.ac.kr, jshim@ynu.ac.kr

Tel: +82-53-810-2576, +82-53-810-2465

Fax: +82-53-810-4627

76.6%에서 마찰계수가 가장 줄어든다^[6]. 그리고 패턴의 깊이와 직경의 비를 이용한 연구 결과에서는 0.01 ~ 0.05의 비에서 가장 마찰계수를 줄이는 우수한 효과를 보였다^[7]. 패턴의 모양은 흔히 사각형과 원형이 사용되지만^[8], 최근에는 ‘star-like’ 모양과 같은 특별한 모양을 이용한 마찰 저감효과가 연구되었다^[9]. 이러한 마찰 저감효과로 인해, 표면조직은 bearing^[10,11], seal^[12], piston ring^[13] 등 여러 분야에서 사용되어 지고 있다.

대부분의 표면조직은 패턴의 모양을 쉽게 제어할 수 있고, 빠른 가공 시간 때문에 레이저를 이용해 가공을 한다. 하지만 레이저 가공법은 필수적으로 burr가 발생하기 때문에, burr를 제거하는 가공을 거쳐야 하는 단점이 있다. 이러한 단점 때문에, 최근에 연삭을 이용한 가공법이 연구 되었다. 연삭을 이용한 가공법은 burr가 발생하지 않고, 가공시간이 레이저보다 훨씬 빠른 장점이 있다^[14,15].

본 연구에서는 연삭가공에 의해 만들어지는 패턴의 효율에 관하여 COMSOL MULTIPHYSICS를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 연삭에 의해 만들어지는 패턴은 기본적으로 다이아몬드 패턴이 만들어 진다. 이 다이아몬드의 모양은 연삭 속도와 깊이에 따라 다양한 크기의 패턴을 만들 수 있지만, 패턴의 효율에 중요한 영향을 미치는 패턴의 크기, 모양, 깊이에 관한 연구가 부족하다. 따라서 본 연구는 패턴의 세장비(가로 세로 비)와 깊이에 따른 효율을 연구하였다. 패턴의 효율은 유체의 두께를 고정하여 하중부하능력(Load carrying capacity)을 계산하는 기존 방법과 달리, 힘의 평형을 이용해 유체의 두께를 계산하여 직접 마찰계수를 계산하였다.

2. 수치해석 및 이론

2.1 이론

본 연구에서는 3D Reynolds 방정식을 사용하여 면 접촉이 발생하는 영역에서의 마찰특성을 분석하였다. 이때 아래의 디스크는 회전하고, 패턴이 있는 모델은 z축을 제외하고 고정 되기 때문에 지배방정

식은 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h}{2} (u_b) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{h}{2} (v_b) \right] \quad (1)$$

유체의 두께는 고정된 특정 상수가 아니라, 회전하는 디스크에 의해 발생하는 유체의 힘과 눌러주는 하중이 평형이 되게 하는 조건을 추가하여 유체의 두께를 계산한다.

마찰력은 윤활이론에서 사용되는 일반적인 전단력 식을 사용하며 다음과 같다.

$$F_x = \int \frac{h}{2} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{h} (u_a - u_b) dA \quad (2)$$

이 마찰력은 압력차에 의한 전단력과 운동에 의한 전단력으로 나눌 수 있으며, 그 식은 각각 다음과 같다.

$$F_{\tau_p} = \int \frac{h}{2} \frac{\partial P}{\partial x} dA \quad (3)$$

$$F_{\tau_v} = \int \frac{\mu}{h} (u_a - u_b) dA \quad (4)$$

압력차에 의한 전단력과 운동에 의한 전단력은 서로 반대 방향으로 작용하며, 압력차에 의한 전단력은 마찰력을 줄이는 역할을 하게 된다.

본 연구에서 사용하는 마찰계수는 다음과 같이 정의한다.

$$C_f = \frac{F_x}{F_{load}} \quad (5)$$

2.2 수치해석

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 회전하는 디스크와 패턴이 평면-평면 접촉하는 모델에 대해 마찰특성을 Reynolds 방정식을 이용하여 해석한다. 해석조건은 Table 1과 같다. 이때, 아래의 디스크는 100rpm 부터 1500rpm까지 15 가지의 회전 조건을 주었고, 패턴이 있는 모델은 0.88N의 하중을 받는다.

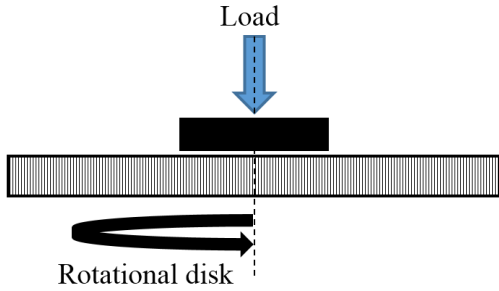


Fig. 1 Schematic of Numerical model

Table 1 Numerical setup

Contact type	pin-on-disk (flat contact area)
Rotational speed (rpm)	100 ~ 1500
Load (N)	0.88
Oil density (kg/m^3)	855
Oil viscosity ($Pa \cdot s$)	0.15
Disk diameter (mm)	70
Numerical model diameter (mm)	3.568

사용되는 윤활유의 밀도는 $855kg/m^3$ 이고, 점도는 $0.15Pa \cdot s$ 이다. 아래 디스크의 직경은 70mm이고, 패턴이 있는 모델의 직경은 3.568mm이다. 아래 디스크의 중심과 패턴이 있는 모델의 중심 사이 거리는 25mm이다. Fig. 2는 패턴 크기의 계략도이며, 패턴의 크기는 Table 2와 같다. 모든 패턴의 면적은 $1mm^2$ 으로 동일하다.

따라서, 패턴의 면적 비는 모두 약 10%이다. 패턴이 있는 모델의 직경 바깥쪽은 모두 대기압의 영향을 받는다. 또한, 모든 벽면은 No-slip 경계조건을 적용하였다. Fig. 3은 shape aspect ratio에 따른 패턴의 모양이다. 모든 패턴의 깊이는 $10\mu m \sim 150\mu m$ 까지 $10\mu m$ 간격으로 15가지 조건을 해석했다.

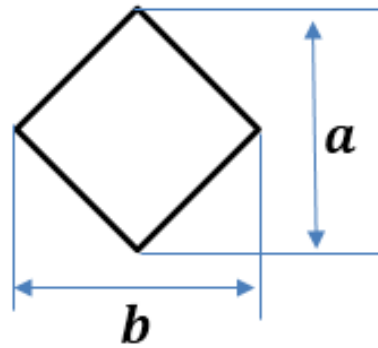


Fig. 2 Schematic of texture size

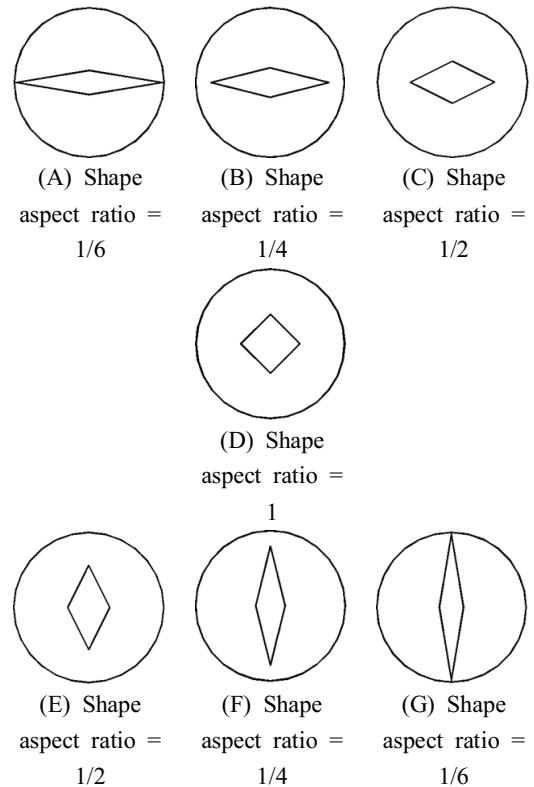


Fig. 3 Numerical models of texture shape aspect ratio

Table 2 Texture size used in numerical model

	a	b
(A)	577 μm	3464 μm
(B)	707 μm	2828 μm
(C)	1000 μm	2000 μm
(D)	1000 μm	1000 μm
(E)	2000 μm	1000 μm
(F)	2828 μm	707 μm
(G)	3464 μm	577 μm

3. 결과 및 고찰

3.1 세장비(Shape Aspect Ratio)의 영향

Fig. 4에서는 회전 속도와 패턴의 가로 세로 비에 따른 마찰계수를 나타낸다. 마찰저감 효과가 가장 높은 패턴은 가로세로비가 1인 정사각형 패턴이다. 그 이유는 Fig. 5, 6, 7에 의해 설명이 가능한데, 각각은 압력차에 의한 마찰력, 운동에 의한 마찰력, 유체의 두께의 그래프이다.

Fig. 5의 그래프에서 패턴이 없는 평면의 경우는 압력차에 의한 전단력이 0에 가깝다. 그 이유는 패턴이 존재하지 않기 때문이다. 패턴이 존재하는 경우에는 패턴에 의해 유량이 달라지기 때문에 압력차가 크게 발생한다. 따라서 압력차에 의

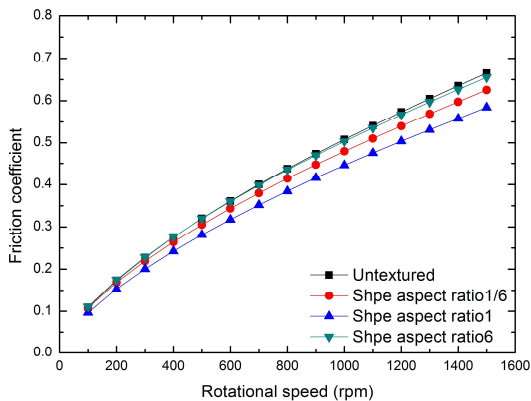


Fig. 4 Friction coefficient in accordance with rotational speed under condition texture depth 30 μm

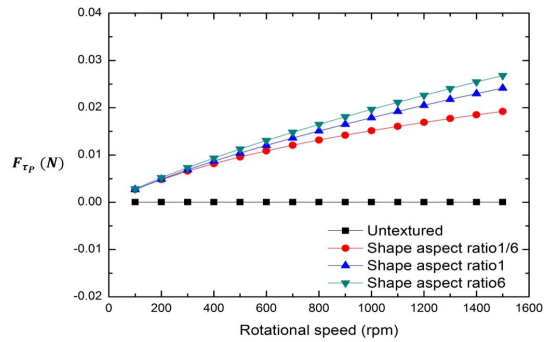


Fig. 5 Shear stress due to pressure gradient in accordance with rotational speed under condition texture depth 30 μm

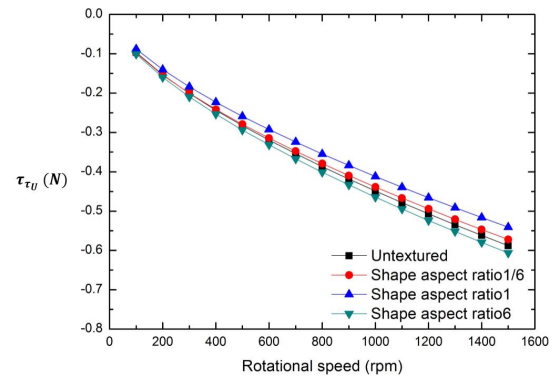


Fig. 6 Shear stress due to wall movement in accordance with rotational speed under condition of texture depth 30 μm

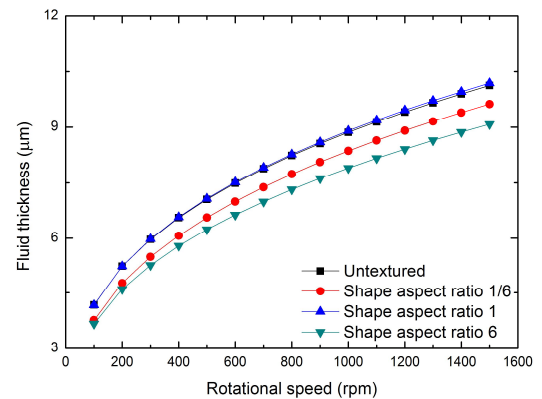


Fig. 7 Fluid thickness in accordance with rotational speed under condition of texture depth 30 μm

한 전단력은 평면에 비해 패턴이 존재하는 경우가 크게 나타나게 된다.

하지만 압력차가 가장 큰 경우는 가로 세로 비가 1/6인 경우이다. 그럼에도 불구하고 가로 세로 비가 6인 모델이 압력에 의한 전단력이 가장 큰 이유는 가로 세로 비가 1/6인 모델보다 x 방향 길이가 6배나 길기 때문이다.

한편, 압력에 의한 전단력은 마찰력과 반대 방향으로 작용한다. Fig. 6의 그래프에서 그 크기가 가장 작은 패턴은 가로 세로 비가 1인 패턴이다. 그 이유는 Fig. 7과 같이 이 경우가 유체의 두께가 가장 두껍기 때문이다. 따라서 마찰계수를 가장 줄여 주는 경우는 가로 세로 비가 1인 모델이며, 회전 속도가 1500rpm이고 깊이가 30 μm 인 경우 마찰저감 효과는 약 12% 이다.

3.2 패턴깊이의 영향

Fig. 8은 회전속도가 1500rpm일 때, 패턴 깊이에 따른 마찰 계수 그래프이다. 패턴의 모양에 따라 마찰계수가 최소가 되는 패턴 깊이는 모두 다르다. 이 깊이는 10 μm ~30 μm 사이에 머무른다. 모든 패턴은 패턴 깊이가 30 μm 보다 깊어지면 마찰계수가 오히려 증가하는 경향을 보인다. 이는 압력에 의한 전단력이 특정 깊이를 지나면 작아지고, 운동에 의한 전단력은 계속 하여 증가하기 때문이다. 하지만, 압력에 의한 전단력은 운동에 의한 전단력에 비해

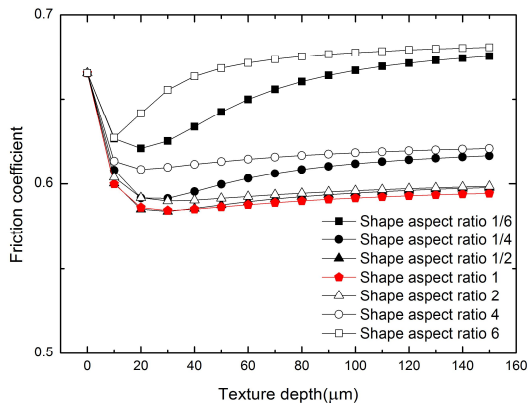


Fig. 8 Friction coefficient in accordance with texture depth under condition of rotational speed 1500rpm

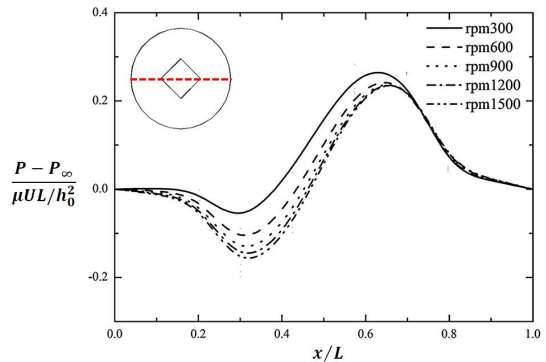


Fig. 9 Dimensionless pressure distribution under condition of texture depth 30 μm

10배 이상 작기 때문에 본 연구에서는 압력에 의한 전단력은 무시할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 마찰계수를 결정하는 중요한 변수는 오직 유체 두께 하나이다.

Fig. 9은 가로 세로 비가 1인 정사각형 모델의 무 차원 압력분포이다. 반시계 방향으로 회전하는 디스크에 의해 모델의 왼쪽에서 오른쪽으로 유체가 흐르게 된다. 따라서 유체가 흐르는 면적이 늘었다가 줄어들게 되어 음의 압력이 발생한 다음 양의 압력이 발생하게 된다.

4. 결론

1. 패턴이 하나만 존재하는 경우, 다이아몬드 패턴 중 가로 세로 비가 1인 정사각형 모양의 패턴이 마찰계수를 줄이는데 가장 효과적이었으며, 이 경우 마찰저감 효과는 약 12% 이다.
2. 기존 해석방법과는 달리, 가장 중요한 변수인 유체 두께를 작동 조건에 따라 유체의 두께 변화를 고려하여 해석을 진행하였다.
3. 압력에 의한 전단력과 운동에 의한 전단력을 분석하여, 패턴이 하나만 존재하는 경우 압력에 의한 전단력의 크기가 미미하여 큰 영향을 미치지 못한다.

후 기

이 논문은 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2014 HIC1A1066502).

REFERENCES

1. Hamilton, D. B., J. A. Walowit. and C. M. Allen. "A theory of lubrication by microirregularities." *Journal of Basic Engineering*, Vol. 88, No. 1, pp. 177-185, 1966.
2. Wakuda, M., Yamauchi, Y., Kanzaki, S. and Yasuda, Y. "Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact." *Wear*, Vol. 254, No. 3, pp. 356-363, 2003.
3. Varenberg, M., Halperin, G. and Etsion, I. "Different aspects of the role of wear debris in fretting wear." *Wear*, Vol. 252, No. 11, pp. 902-910, 1966.
4. Yamakiri, H., Sasaki, S., Kurita, T. and Kasashima, N. "Effects of laser surface texturing on friction behavior of silicon nitride under lubrication with water." *Tribology International*, Vol. 44, No. 5, pp. 579-584, 2011.
5. Kovalchenko, A., Ajayi, O., Erdemir, A., Fenske, G. and Etsion, I. "The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact." *Tribology International*, Vol. 38, No. 3, pp. 219-225, 2005.
6. Ma, C. and Zhu, H. "An optimum design model for textured surface with elliptical-shape dimples under hydrodynamic lubrication." *Tribology International*, Vol. 44, No. 9, pp. 987-995, 2011
7. Wang, X., Kato, K., Adachi, 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.
8. Nam-Seong Hwang. "A Study on Friction Characteristics According to Micro-dimple Patterns." *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 124-130, 2015.
9. Uddin, M. S. and Liu, Y. W. "Design and optimization of a new geometric texture shape for the enhancement of hydrodynamic lubrication performance of parallel slider surfaces." *Biosurface and Biotribology*, Vol. 2, No. 2, pp. 59-69, 2016.
10. Tala-Ighil, N., Fillon, M. and Maspeyrot, P. "Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing." *Tribology International*, Vol. 44, No. 3, pp. 211-219, 2011.
11. Brizmer, V., Kligerman, Y. and Etsion, I. "A laser surface textured parallel thrust bearing." *Tribology Transactions*, Vol. 46, No. 3, pp. 397-403, 2003.
12. Kligerman, Y. and Etsion, I. "Analysis of the hydrodynamic effects in a surface textured circumferential gas seal." *Tribology Transactions*, Vol. 44, No. 3, pp. 472-478, 2001.
13. Ryk, G. and Etsion, I. "Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction." *Wear*, Vol. 261, No. 7, pp. 792-796, 2006.
14. Ko, T. J., Han, D. S., Qiu, K. and Park, J. K. "Grinding Technology for Surface Texturing." *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 31, No. 5, pp. 367-373, 2014.
15. Ji-Young Jeong., Yu Zhen., Sahar M. Sana Ullah. and Taejo Ko. "Slope Change of Surface Texturing Pattern Using Grinding." *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 15, No. 4, pp. 8-15, 2016.