

그리스 윤활 하에서 표면요철의 영향

김성기[†] · 송근철 · 김상범 · 채영훈*

두산인프라코어, *경북대학교 기계공학과

Effects of Surface Texturing under Grease Lubrication

Sunggi Kim[†], Kuenchul Song, Sangbeom Kim, and Younghun Chae*

Doosan Infracore Co., Ltd.

**Dept. of Mechanical Engineering, KyungBook University*

(Received August 4, 2008; Accepted August 29, 2008)

Abstract – It is well known that surface texturing improves the tribological properties of mechanical components for enhancing hydro-dynamic effect or serving as a micro reservoir. There are not, however, enough researches to reveal the effects of surface texturing on the tribological properties under grease lubrication which is used in lubricating many mechanical elements. In the present study, therefore, the effects of surface texturing on the tribological properties are investigated under grease lubrication based on an experimental approach. The results show that surface texturing decreases friction coefficient. It is found that the friction coefficient can be decreased by controlling the diameter and density of micro-dimple. The diameter of dimple is more effective under high load and low speed than otherwise. And, the density of dimple is effective under low load and high speed.

Key words – friction(마찰), pin-on-disk(핀-온-디스크), surface texturing(표면요철), grease(그리스)

1. 서 론

동력 기계 부품에서 마찰에 의한 에너지 손실을 절감하기 위한 연구가 여러 가지 방법으로 이루어지고 있다. 예를 들면 새로운 윤활유의 개발 및 접촉표면의 연마 또는 코팅 등이 있다. 그런데, 최근 미국과 일본 등에서는 또 다른 에너지 절감 및 마찰 손실 개선 방법의 하나로 Surface texturing에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Surface Texturing 기술은 윤활제를 매개로 상대 운동을 하는 두 표면 사이의 윤활 특성을 개선할 것을 목적으로 두 표면 중 적어도 한 표면에 딩플(Dimple)이나 그루브 같은 요철을 다수로 가공하는 것을 말한다. 표면의 요철은 마모입자 Trapping, 윤활제 저장, Hydrodynamic 압력 발생 기능을 한다고 알려지고 있으며, 본 기술의 효과는 국내외적으로 입증되고 있다.

Surface texturing 기술은 주로 내마모성이 요구되는 자동차 부품의 표면에 다양한 패턴으로 응용되고 있으며 마찰저감, 내마모성 개선, 소착 방지, 운전 온도 저감 등을 목적으로 한다.

1966년 Hamilton 등은 미세 구멍이 미세 동압 베어링 역할을 할 수 있음을 보였다[1]. 이 효과는 기계적 seal(Mechanical seal)과 같이 두 면이 거의 평행하게 상대운동을 하여 동압 효과가 미비한 경우에 그 효과가 큰 것으로 알려졌다[2,3]. Etsion 등은 규칙적으로 미세 구멍이 배열된 기계적 seal에 대해 이론적인 연구와 실험을 수행하여 반구형의 딩플 형상이 윤활 성능 개선을 위한 최적의 Surface texturing 형상이라고 하였으며, 딩플 직경에 대한 깊이의 비를 주요 변수로 제시하였다[4,5]. 또한, 일본 동북대학교의 Kato교수는 SiC 세라믹을 대상으로 Surface texturing의 깊이/지름의 비, 밀도, 깊이에 대하여 간단한 이론적 접근과 실험적인 연구를 통하여 water pump의 부피를 75% 감소시키면서 효율은 2배 증가시키는 성과를 얻었다[6].

[†]주저자 · 책임저자 : holybowl@doosan.com

또한 Surface texturing의 메커니즘을 Hydrodynamic effect와 Storage effect으로 나누어 이론적 해석을 수행함으로써 학문적 발전을 도모하였다[7]. 이를 바탕으로 최근 2003년도에 SiC 세라믹에 대하여 Surface texturing을 적용하여 Wear particle trapping과 인위적인 수직압력유발로 마찰 계수를 감소시킬 수 있음을 보고하였다[8]. 또한, Wakuda 등은 선 접촉 하에서의 마찰 시험을 통해 딴플의 직경과 접촉 선 폭의 관계를 밝혔다[9].

이상의 연구는 Surface texturing을 통해 윤활 특성이 개선될 수 있음을 보이고 그 메커니즘을 밝히는 데 집중해 왔다. 하지만 일반적으로 많이 사용되는 윤활제인 그리스를 윤활제로 하는 경우에 대한 연구가 전무한 실정이라 그리스를 윤활제로 하는 기계 요소에 Surface Texturing을 적용하는 데 있어 어려움이 많은 실정이다. 이에 본 연구는 그리스 윤활 환경 하에서 Surface texturing이 마찰 계수에 미치는 영향을 밝혀 그리스를 윤활제로 사용하는 기계 요소에 Surface texturing을 적용하는 데 있는 유의한 정보를 제공하고자 하였다. 이를 위해, Pin-on-disk 마찰시험기를 사용하여 다양한 운전조건 및 Surface Texturing에 대해 시험을 수행하고 마찰계수를 측정하여 Surface texturing이 마찰계수에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험

2-1. 실험 장비

본 실험에서는 Surface Texturing의 효과를 확인하기 위해 Fig. 1과 같은 Pin-on-disk 마찰시험기를 사용하여 다양한 운전조건 및 Surface Texturing에 대해 시험을 수행하고 마찰계수를 측정하였다. Fig. 1의 시험장치는 디스크 시편을 타이밍 벨트를 통해 모터로 회

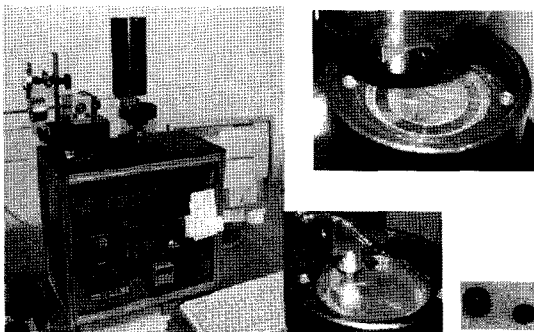


Fig. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Working conditions

Parameters	Condition
Disk material	Bearing metal
Pin material	Bearing metal
Pin dia.	6 mm
Disk dia.	40 mm

전시켜 핀과의 상대운동을 발생시킨다. 또한 핀 시편 위에서 추를 이용하여 시편 간에 하중을 가하고 핀 시편을 잡고 있는 바(bar)의 디스크 회전 방향의 움직임을 로드셀로 구속하면서 마찰력을 측정하였다.

2-2. 시편

본 실험에서 사용된 시편은 Table 1과 같다. 핀 시편과 디스크 시편 모두 베어링강을 사용하였으며, 핀 시편의 직경은 6 mm, 디스크 시편의 직경은 40 mm이다.

Surface Texturing의 효과를 확인하기 위해 디스크 시편과 접촉하는 핀 시편의 마찰면에 미세 딴플(dimple)을 가공하였는데, Photolithography 후 화학적 에칭(Etching)으로 원하는 미세 딴플 패턴을 가공하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 딴플 패턴(Dimple pattern)을 나타내고 있다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 육각 배열(Hexagonal array)로 딴플을 배열하였으며, 이때의 딴플 밀도, 피치(Pitch) 등은 그림에 표기한 대로 계산할 수 있다. 여기서 딴플 밀도는 전체 핀 면에서 딴플이 가공된 면적이 차지하는 비율을 의미하며, 피치는 한 딴플의 중심에서 가장 인접한 딴플의 중심까지의 거리를 의미한다. 시험에 사용된 딴플의 직경, 밀도, 깊이, 피치는 Table 2에 표기하였다. 직경은 40 μm, 70 μm, 100 μm을 사용하였고, 밀도는 10%, 15%, 20%, 25%, 30%를 사용하였으며, 깊이는 모두 4~5 μm으로 가공하였다.

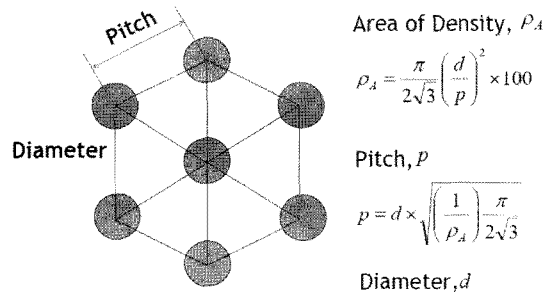


Fig. 2. Hexagonal array.

Table 2. Surface texturing

Diameter μm	Density %	Pitch μm	Depth μm
40	10	120	4~5
40	15	98	4~5
40	20	85	4~5
40	25	76	4~5
40	30	70	4~5
70	10	211	4~5
70	15	172	4~5
70	20	149	4~5
70	25	133	4~5
70	30	122	4~5
100	10	301	4~5
100	15	246	4~5
100	20	213	4~5
100	25	190	4~5
100	30	174	4~5

Table 3. Test conditions

Parameter	Condition
Pressure	1.56~7.80 MPa
Speed	0.02~0.3 m/s
Lubricant	Grease
Temp.	About 20°C

Fig. 3은 딩플 패턴이 가공된 핀 시편을 SEM (Scanning electron microscope)으로 촬영한 것이다. 사진의 시편에는 직경 100 μm의 딩플이 10% 밀도로 가공되어 있다.

2.3. 실험 방법

본 실험의 시험 조건은 Table 3과 같다. 시편 간 면압은 1.56~7.80 MPa이며 디스크의 회전속도는 9.6~143.3 rpm이다. 윤활제는 그리스(Grease)를 사용하였으며, 실험실의 온도는 약 20°C이다.

실험은 하중 별로 이루어졌다. 하나의 하중을 가한 상태에서 회전 속도를 여러 가지로 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. 하중을 변경하여 시험을 수행할 때는 30분간의 run-in을 수행한 후 실험데이터를 추출하였다. 조건 별로 1분간 마찰력을 측정하였으며, 이를 평균하여 각 조건에 해당하는 마찰력으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 운전 영역

Fig. 4는 Surface Texturing 가공을 하지 않은 시편에 대해 다양한 하중과 다양한 속도에 대해 마찰력을

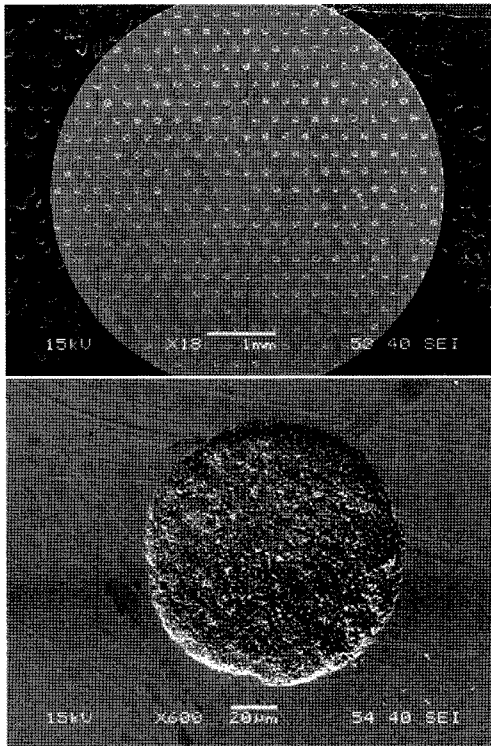


Fig. 3. Surface texturing on the pin surface (Dia. = 100 μm, Den. = 10%).

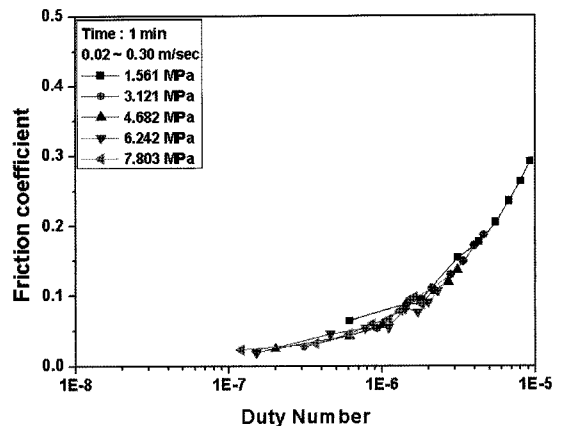


Fig. 4. Stribeck curve (Un-texturing).

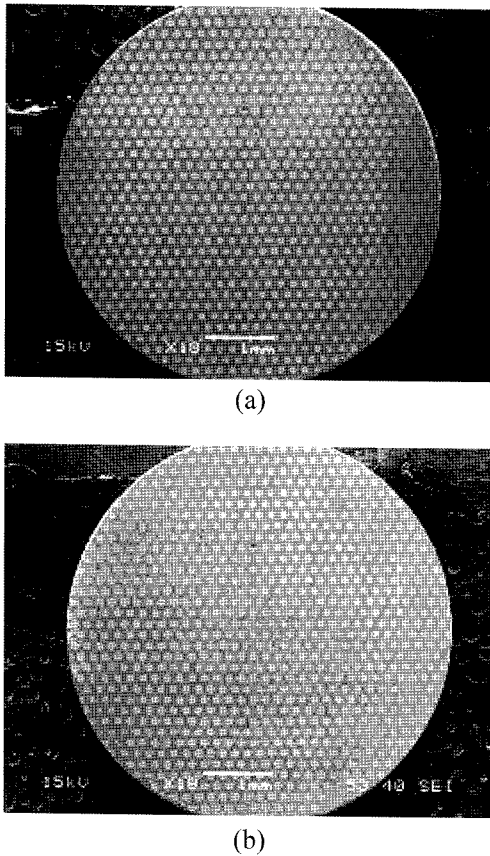


Fig. 5. Pin surface (SEM): (a) before experiment (b) after experiment.

측정한 후 Duty number와 마찰계수와의 관계를 그린 것이다. 여기서 Duty number는 점성계수와 선속도와 핀직경의 곱을 하중으로 나눈 값으로 흔히 Sommerfeld 수라고 부르는 값이다.

일반적으로 유체윤활 실험이 안정되게 이루어졌다면 다양한 운전 조건에서 얻어진 실험 데이터로 마찰계수와 Duty number의 관계를 나타내는 Stribeck 선도를 그렸을 때, 그 선도가 일관성 있게 나타나야 한다. 본 실험의 결과인 Fig. 4를 보면 다양한 하중과 다양한 회전 속도에서 이루어진 실험의 데이터지만 Duty number와 마찰 계수가 일정한 경향을 보이며 매끄러운 Stribeck 선도를 그리고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 본 실험은 상당히 안정된 환경에서 이루어졌으며, 그 데이터는 신뢰할 만하다고 할 수 있다.

또한, Fig. 4를 보면 본 실험에서 행해진 모든 운전 조건에서 Duty number가 커질수록 마찰계수 또한 커지는 것을 알 수 있다. 즉, 실험이 이루어진 운전 조

건은 유체 윤활 조건이든지 적어도 혼합 윤활 상태 인 것으로 볼 수 있다. 이는 SEM 사진으로도 확인할 수 있다. Fig. 5는 실험 전 후 핀 시편의 표면을 보여주고 있는데, 이로부터 알 수 있듯이 실험 전 후 마모로 인한 심각한 표면의 변화는 관찰되지 않고 약간의 미세 마모만이 확인된다.

3-2. Surface Texturing과 마찰계수

Fig. 6은 100 μm 의 덤플을 10%의 밀도로 가공한 시편의 시험 결과를 나타내고 있다. Fig. 6과 같이 다양한 하중과 다양한 속도에 대해 마찰력을 측정 한 후 Duty number와 마찰계수와의 관계를 그린 것이다.

Fig. 4와 Fig. 6을 비교해보면, Surface texturing이 마찰계수에 영향을 주고 있는 것을 확인할 수 있다. Duty number가 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 부근에서는 Fig. 6의 마찰 계수가 더 낮으나 Duty number가 이보다 더 커져 10^{-5} 정도가 될 때는 Fig. 6의 마찰계수와 Fig. 4의 마찰계수가 비슷한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 실제로, Un-texturing 결과인 Fig. 4의 결과에서는 Duty number $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 일 때의 평균 마찰계수가 0.040인 것에 반해, Texturing 결과인 Fig. 6의 결과에서는 Duty number $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 에서의 평균 마찰계수가 0.027인 것을 확인할 수 있다. 또한, Duty number가 10^{-5} 가 되면 Fig. 4에서는 마찰계수가 0.3정도인데, Fig. 6에서는 0.3이 조금 넘는다. 즉, Surface texturing으로 인해 Duty number가 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 부근에서는 마찰 계수가 작아지나 Duty number가 이보다 증가해서 10^{-5} 정도가 될 때는 Surface texturing에 의한 마찰 계수 감소효과가 사라지는 것으로 보인다. 이처럼, 덤플 형

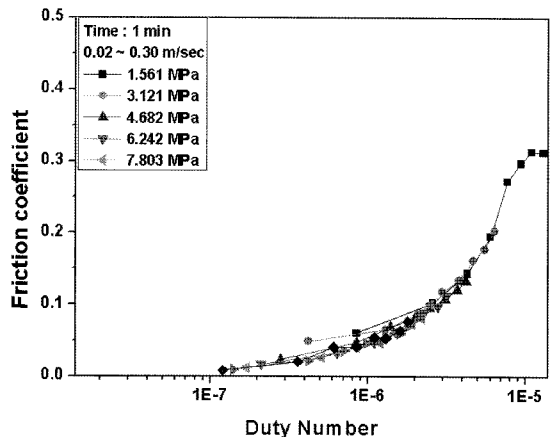


Fig. 6. Stribeck curve (Dia. = 100 μm , Den. = 10%).

태의 Surface texturing을 통해 마찰계수가 저감될 수 있으며, 그 효과는 상대적으로 면압이 높고 회전 속도가 느릴 때 더 커짐을 알 수 있다.

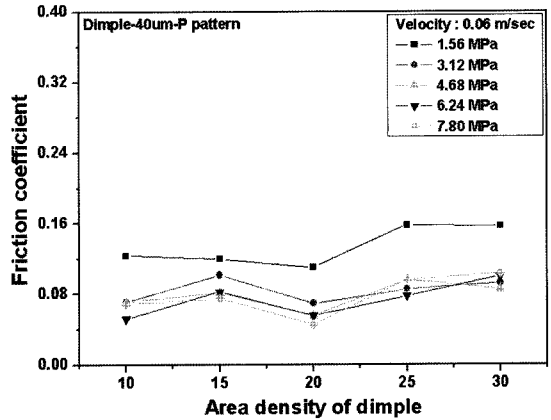
지금까지의 다른 연구 결과에 따르면, Surface texturing은 마모입자 Trapping, 윤활제 저장, Hydrodynamic 압력 발생 기능을 한다. 즉, 상대 운동을 하는 두 면 사이의 간격이 너무 얇아 윤활제 공급이 원활하지 않은 상황에서도 미세 구멍 속에 있던 윤활제가 두 면 사이의 고체 접촉을 줄이고 나아가 Hydrodynamic 압력을 발생시켜 마모와 마찰력을 감소시킨다고 한다. 이에 따르면, 유막두께가 매우 얇을 것으로 판단되는 Duty number $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 에서 마찰계수가 저감되는 효과는 Surface texturing이 윤활제 공급이나 Hydrodynamic 압력 발생 역할을 하기 때문인 것으로 이해될 수 있고, Duty number가 더 커져 10^{-5} 정도가 되었을 경우의 결과는 유막의 두께가 두꺼워져서 Surface texturing의 효과가 상대적으로 미미해지는 것으로 이해될 수 있다. 또한, Duty number $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 의 영역은 그 마찰계수의 크기가 극히 작은 점과 Surface texturing이 마찰계수에 상대적으로 큰 영향을 미치는 점으로 미루어 볼 때, 이 영역은 유체윤활에서 혼합윤활로 천이되는 전 단계로 볼 수 있다.

3-3. 밀도의 영향

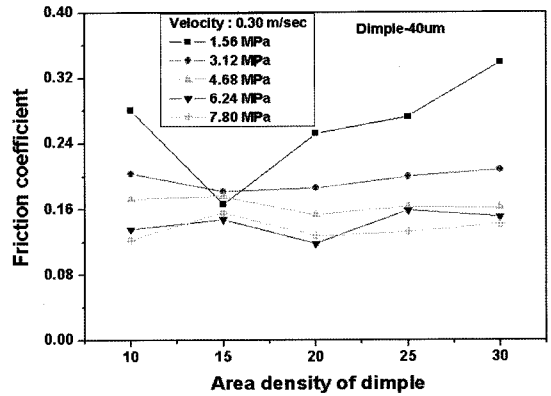
Fig. 7은 딴플 밀도가 마찰계수에 미치는 영향을 나타내고 있다. 이 그림의 데이터는 딴플 직경이 40 μm 일 때이며, Fig. 7-(a)는 회전 속도가 0.06 m/s의 경우이고 Fig. 7-(b)는 회전 속도가 0.3 m/s인 경우이다.

본 그림을 살펴보면 면압이 낮고 회전 속도가 빠른 경우에는 딴플 밀도가 마찰 계수에 비교적 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 그렇지 않고 면압이 높고 회전 속도가 느린 경우에는 딴플 밀도가 마찰 계수에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 보인다. Fig. 7-(a)를 보면 모든 면압 조건에서 밀도의 영향이 나타나지 않으나 Fig. 7-(b)를 보면 비교적 면압이 낮은 1.56 MPa과 3.12 MPa의 실험 데이터를 보면 밀도의 영향이 나타남을 확인할 수 있다. 즉, Duty number가 커질수록 딴플 밀도의 영향이 나타나고 딴플 직경이 40 μm 인 경우에는 딴플 밀도가 15%정도일 때 마찰 계수가 최소가 된다.

Fig. 7에서 확인한 것처럼 Duty number가 클 때 딴플 밀도의 영향이 현저히 나타나는데 이 영역은 Hydrodynamic 효과가 상대적으로 큰 영역이다. 이는



(a) Velocity = 0.06 m/s



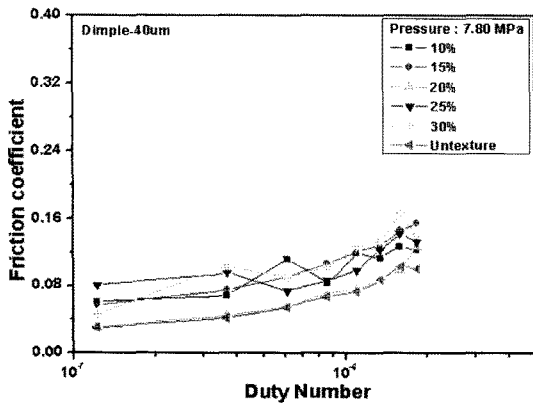
(b) Velocity = 0.3 m/s

Fig. 7. Density effects (Dia. = 40 μm).

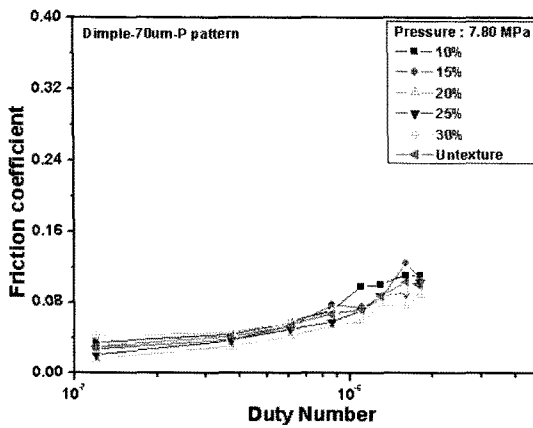
Hydrodynamic 효과가 크게 작용해서 유체윤활이 이루어질 때 딴플 밀도의 영향이 크게 나타나는 것으로 이해될 수 있다. 즉, 딴플 밀도는 딴플의 Hydrodynamic 효과에 크게 영향을 주는 인자로서 경계윤활이나 혼합윤활 일 때 보다는 유체 윤활 상태 일 때 마찰 계수에 큰 영향을 주는 것으로 이해된다. Fig. 7-(b)에서 면압 1.56 MPa일 때는 딴플 밀도가 15%일 때 Hydrodynamic 효과가 최대가 되어 마찰 계수를 크게 낮추는 것으로 보였으며, 면압 3.12 MPa일 때는 최적 딴플 밀도가 15~20% 정도로 소폭 증가하는 것이 확인되었다.

3-4. 직경의 영향

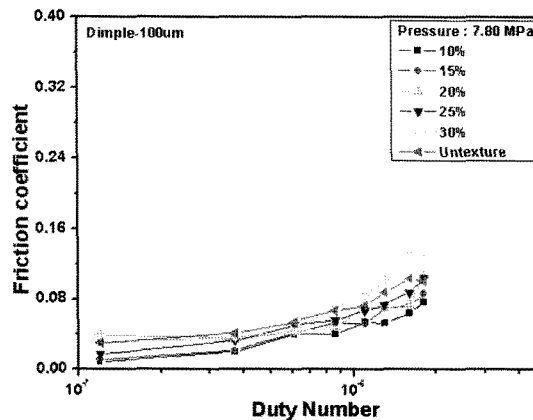
Fig. 8은 면압이 7.8 MPa인 경우의 실험데이터로서 여러 가지 딴플 직경에 대해 Duty number와 마찰 계



(a) Dia. = 40 μ m



(b) Dia. = 70 μ m



(c) Dia. = 100 μ m

Fig. 8. Diameter effects (Pressure=7.80 MPa).

수와의 관계를 나타내고 있다. 그림 Fig. 8(a), (b), (c)에서 Un-texturing data는 모두 같은 시험 결과이며, Texturing data는 40 μ m, 70 μ m, 100 μ m의 딴플 직

경에 대해 밀도를 바꾸어 가며 실험한 데이터를 딴플 직경 별로 각각 정리해 표시하였다. 직경 40 μ m의 실험 결과를 보면 모든 Texturing data가 Un-texturing data보다 크나, 직경 100 μ m의 실험 결과를 보면 상당히 많은 Texturing data가 Un-texturing data보다 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 직경이 70 μ m인 경우의 결과는 그 사이의 과도기 단계인 것이 확인된다. 즉, 본 실험 범위 내에서는 Dimple 직경이 클수록 Surface texturing에 의한 마찰 계수 감소 효과가 커지는 것으로 확인되었다. 물론, 딴플 직경이 무한히 커질 때까지 이 경향이 유효하지는 않을 것이나, 본 연구에서는 이를 확인하지 못했으며, 앞으로 계속되는 연구를 통해 확인해야 할 것이다.

이 현상은 비록 그 크기는 작지만 면압이 낮은 경우의 시험 결과에서도 확인할 수 있어, 본 연구의 전체 시험 범위 내에서는 딴플의 직경이 클수록 마찰 계수가 낮아지는 현상을 확인하였다. 이는 딴플의 직경이 클수록 유체 윤활 영역에서는 Hydrodynamic 효과가 증대되고, 혼합 윤활 영역에서는 윤활제 저장 및 공급 능력이 향상되기 때문에 마찰 계수가 감소하는 것으로 이해된다.

3-5. 앞으로의 연구

본 실험결과는 딴플 직경이 클수록 마찰계수가 저감되는 결과를 보였다. 하지만, 딴플 직경이 무한히 커질 때까지 이 경향이 유효하지는 않을 것이며 최적의 크기가 존재할 것이다. 때문에 현 운전 조건에서 딴플 직경의 최적 값을 찾는 연구가 우선 진행되어야 한다. 나아가, 속도, 면압, Duty number 등의 운전 조건에 따른 최적의 딴플 형상을 맵 형태로 제시할 수 있는 연구가 필요할 것이다.

또한, 앞 절에서 살펴본 바와 같이 Surface texturing의 효과는 운전 조건에 따라 많이 달라진다. 즉, 운전 조건에 따라 윤활 특성을 극대화 시키는 Surface texturing의 최적형상이 바뀌는 것이다. 따라서 Surface texturing의 윤활 특성 개선 메커니즘을 밝히는 것이 무엇보다도 필요한 연구임에 틀림없다. 하지만 이를 위해서는 보다 많은 연구가 이루어져 할 것으로 보이며 본 연구는 Surface Texturing의 윤활 특성 개선 메커니즘을 밝히기 위한 하나의 자료가 될 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 그리스 윤활 환경 하에서 미세 표 요철이 윤활 특성에 미치는 영향을 밝히기 위해 Pin-on-disk 마찰시험기를 사용하여 다양한 운전조건 및 Surface texturing에 대해 마찰계수를 측정하였으며, 그 결과를 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 덩플 형태의 Surface texturing을 통해 마찰계수가 저감될 수 있으며, 그 효과는 상대적으로 면압이 높고 회전 속도가 느릴 때 더 크다.

2. 면압이 낮고 회전속도가 빠를 때는 덩플의 밀도가 마찰 계수에 큰 영향을 주며, 덩플 밀도가 15~20%일 때 마찰 계수가 최소가 된다.

3. 본 실험 범위 안에서는 덩플의 직경이 커질수록 마찰 계수가 감소한다. 그 효과는 면압이 높고 회전속도가 느릴 때 커진다.

참고 문헌

- Hamilton, D. B., Walowit, J. A., and Allen, C. M., "A Theory of Lubrication by Microasperities", *ASME Journal of Basic Engineering*, Vol. 88, No. 1, pp. 177-185, 1966.
- 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.
- 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.
- Etsion, I. and Burstein, L., "A Model for Mechanical Seals with Regular Microsurface Structure", *Tribology Transaction*, Vol. 39, No. 3, pp. 677-683, 1996.
- Etsion, I., Halperin G., and Greenberg, Y., "Increasing Mechanical Seal Life with Laser-Textured Seal Faces", *15th International Conference on Fluid Sealing BHR Group, Maastricht*, pp. 3-11, 1997.
- 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.
- 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, No. 10, pp. 703-711, 2001.
- Wang, X. and Kato, K., "Improving the Anti-Seizure Ability of SiC Seal in Water with RIE Texturing", *Tribology Letter*, Vol. 14, No. 4, pp. 275-280, 2003.
- 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, pp. 356-363, 2003.