

무윤활 상태에서 미세공이 가공된 표면의 마찰거동에 관한 연구

오석주[†] · 김성기[‡] · 김경웅^{‡*}

한국과학기술원 기계항공시스템학부, *두산인프라코어(주)

A Study on Friction Behavior of Textured Surface in Unlubricated State

Seok-Ju Oh[†], Sung-Gi Kim[‡] and Kyung-Woong Kim^{‡*}

School of Mechanical, Aerospace & Systems Engineering, KAIST

*Doosan Infracore Co., Ltd

(Received June 10, 2009; Revised June 28, 2009; Accepted July 3, 2009)

Abstract – In this study, friction tests were carried out in order to investigate the friction behavior of textured surface in unlubricated state using ball-on-disk type apparatus. Test specimens were SUJ2 bearing steel ball and SM45C steel disk. Square arrays of circular micro-dimples were created on the surface of disk specimen by Nd:YAG Laser. Friction tests were performed for the disk specimen with various micro-dimple parameters and was also conducted for the variation of normal loads and relative velocities. The results showed that friction coefficient of textured surface was lower than that of non-textured surface and the deeper depth of micro-dimple was, the lower friction coefficient obtained at the same diameter of micro-dimple in unlubricated state. Area density of micro-dimple had an effect on the friction coefficient. It was also found that friction coefficient generally decreased with the increase of normal load and relative velocity.

Key words – friction coefficient(마찰 계수), unlubricated state(무윤활 상태), micro-dimple(미세공), ball-on-disk type apparatus(볼-온-디스크 실험 장치)

1. 서 론

현재 산업체에서 사용되는 기계 시스템은 많은 부품들로 이루어져 있으며, 이 부품들 중의 일부는 기계 시스템의 작동을 위해 서로 접촉을 유지하며 상대운동하게 된다. 이러한 기계 부품에서 발생한 마찰과 마모는 기계 시스템의 손상 및 수명 단축, 에너지 손실의 주된 원인이 된다. 따라서 이러한 마찰과 마모를 저감시키기 위한 효과적인 마찰 저감법이 필요하다.

기계 시스템이 극고온 또는 극저온 상태에서 운전되거나 고충정 상태를 요구하는 경우 윤활제를 사용하기가 어렵기 때문에 건조 마찰 상태가 필연적으로 발생하게 된다[1]. 또한 기계 시스템이 지속적인 고하중, 저속 상태에서 운전 되거나 윤활제의 공급이 원활하지 못한 경우 기계 시스템은 경계 윤활 상태 혹은 건조 마찰 상태를 경험하게 된다. 따라서 이러한 상황에서도 기계 시스템이 원활하게 운전되기 위해서는 경계 윤활 혹은 건조 마찰 상태에서도 마찰 계수의 급격한 증가가 없어야 한다.

최근 경계 윤활 혹은 건조 마찰 상태에서 발생하는 마찰과 마모를 줄이기 위해 마찰이 발생하는 미끄럼 면

[†]주저자 : ohseokju@kaist.ac.kr

[‡]공동저자 : holybowl@doosan.com

^{‡*}책임저자 : taeho@kaist.ac.kr

에 마모 입자를 구속시키며 윤활유를 저장할 수 있는 미세공들을 일정한 배열로 가공하는 마찰 저감법이 많은 주목을 받고 있다. 이러한 마찰 저감법을 텍스처링 가공에 의한 마찰 저감법 이라고 한다. 텍스처링 가공에 의한 마찰 저감법의 장점으로는 표면에 가공된 미세공에 의한 윤활유의 저장, 마모 입자들의 구속, 유체동압효과 발생으로 인한 부하지지능력 향상 등이 있다[2].

Etsion 등은 텍스처링 가공된 mechanical seal의 해석을 통해서 미세공의 면적 밀도와 미세공의 직경과 깊이의 비가 윤활 성능 개선을 위한 매우 중요한 설계 변수임을 보였다[3,4]. Ryk 등은 경계 윤활 상태에서 텍스처링 가공된 피스톤 링과 실린더 라이너에 대한 마찰 실험을 통해서 텍스처링 가공된 경우가 그렇지 않은 경우 보다 마찰계수가 30%~40% 저감 된다고 보고하였다[5]. Wakuda 등은 경계 윤활 상태에서 선 접촉 하에서의 마찰 실험을 수행하여 미세공의 직경과 접촉 선 폭의 관계를 규명하였다[6]. Wang과 Kato 등은 물을 윤활제로 사용하여 SiC 세라믹 표면에 대하여 사각형과 원형의 미세공들을 가공하여 마찰 실험을 수행하였다. 그들은 사각형의 미세공은 마모 입자를 구속하는 역할을, 원형의 미세공은 인위적인 수직압력을 유발시키는 역할을 하여 마찰을 감소시킨다고 보고하였다[7].

앞서 언급한 것과 같이 최근 기계 시스템의 마찰을 저감 시키기 위해서 표면에 미세공을 가공한 기계 부품을 많이 사용하고 있다. 하지만 이러한 기계 부품이 극고온, 극저온 또는 고하중 저속 상태에서의 운전과 같은 다소 가혹한 환경 조건에서 사용되는 경우에 경험 할 수 있는 건조 마찰 상태에 대한 연구는 많이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 ball-on-disk 형태의 실험 장치를 이용하여 건조 마찰 상태에서 미세공이 가공된 표면의 마찰 실험을 통해서 미세공의 직경, 깊이, 면적 밀도의 변화와 수직 하중 및 상대 운동 속도의 변화가 마찰 거동 및 마찰 계수에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

2. 실험

2-1. 실험 장치

본 연구에서는 텍스처링 가공된 표면의 마찰 실험을 수행하기 위해 Fig. 1과 같은ball-on-disk형태의 실험 장치를 이용하였다. 회전축 구동용 모터는 마찰력의 변화에 의한 영향을 받지 않으면서 미끄럼 속도를 정확

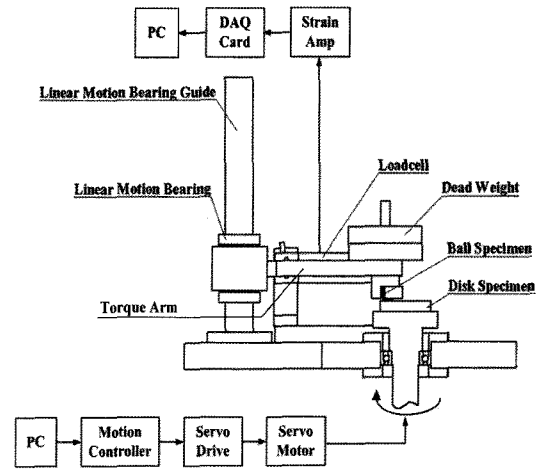


Fig. 1. Schematic view of experimental apparatus.

히 제어하기 위해 정격출력 용량 2kW, 정격 회전속도 1000 rpm의 AC 서보 모터를 사용했다. 서보 모터의 속도는 PC-모션 컨트롤러-서보 모터 드라이브로 구성된 속도 제어부에 의해 조절된다. 서보 모터에 의해 실험 장치에 설치된 회전축이 회전하게 되며, 각 회전축에 고정시킨 디스크 시편이 토크암 끝부분의 시편 홀더에 고정된 볼 시편과 미끄럼 접촉하며 회전하게 된다. 볼 시편은 토크 암의 끝부분에 만들어진 시편 홀더에 고정되며, 토크 암의 반대쪽 끝에는 연직 방향과 회전 방향의 운동이 자유로운 직선 운동 베어링이 부착되어 직선 운동 베어링 안내축에 끼워져 있다. 따라서 접촉면에서 발생하는 마찰력은 직선 운동 베어링 안내축을 회전 중심으로 토크 암을 회전시키는 토크로 작용하므로 로드셀로 이 토크에 의한 운동을 구속함으로써 구속력인 마찰력을 측정 하였다. 이때 직선 운동 베어링에서 작용하는 마찰 토크는 무시하였다. 마찰면에 가해지는 수직 하중은 토크 암의 무게와 토크 암 위에 올려진 추의 무게의 합이 된다.

2-2. 실험 장치

본 실험에 사용된 볼 시편은 직경이 15.875 mm이고 재질은 SUJ2 베어링 강이다. 볼 시편은 시편 홀더에 안정적으로 고정 시키기 위해서 한쪽 끝을 깊이 2 mm 정도 가공하여 평면을 만들었다. 디스크 시편은 직경이 55 mm, 두께가 10 mm이며 재질은 SM45C기계구조용 탄소강이다. 실험에 사용된 모든 디스크 시편은 연삭 가공으로 발생한 표면 거칠기의 방향성을 없애기 위해서 220 mesh 사포로 1차 건식연마를 하여 그 방

Table 1. Specifications of laser

Specifications of laser	
Source	Nd:YAG
Max power	150 W
Wave length	1064 nm
Frequency(Q-S/W)	0~30 kHz
Beam stability	max 2%

향성을 없앴으며 텍스처링 가공 후 미세공 입구 주변에 발생한 burn를 제거하기 위해서 1200 mesh 사포로 다시 2차 건식연마를 수행하였다. 이때 텍스처링 가공을 하지 않은 디스크 시편에도 동일한 건식연마를 수행하였다.

텍스처링 가공은 미끄럼 면이 발생하는 디스크 시편의 표면에 Q-switched Nd:YAG 레이저를 사용하였으며 각 실험 조건에 해당하는 치수의 미세공을 정사각형 형태의 배열로 가공하였다. 텍스처링 가공에 사용된 레이저의 사양은 Table 1과 같다.

2-3. 실험 조건

실험 조건은 다음과 같이 크게 4가지로 나눌 수 있다.

- (1) 미세공의 직경과 깊이 변화 조건
- (2) 미세공의 직경과 면적 밀도 변화 조건
- (3) 수직 하중 변화 조건
- (4) 상대 운동 속도 변화 조건

본 연구의 모든 마찰 실험은 대기 온도가 19~25°C 이고 상대습도가 23~37% R.H.인 건조 마찰 상태에서 각 실험 조건 당 3회 반복 수행되었다.

실험 조건(1)은 미세공의 면적 밀도를 20%로 동일하게 한 후 미세공의 직경 75 μm, 100 μm, 190 μm의 3가지 경우와 미세공의 깊이 7 μm, 15 μm, 30 μm의 3가지 경우가 서로 조합된 총 9가지의 경우에 대해서 수직 하중 29.43 N이고, 상대 운동 속도 0.05 m/s인 운전 조건에서 1800초 동안 수행하였다. 이때 텍스처링 가공된 표면의 마찰 거동과 텍스처링 가공이 안된 표면의 마찰 거동을 비교하기 위해서 텍스처링 가공이 안된 표면에 대한 실험을 동일한 실험 조건에서 4회 수행하였다.

실험 조건(2)는 미세공의 깊이를 30 μm로 동일하게 한 후 미세공의 직경 75 μm, 100 μm, 190 μm의 3가지 경우와 미세공의 면적 밀도 10%, 20%, 30%, 40%의 4가지 경우가 서로 조합된 총 12가지 경우에 대해서 실험 조건(1)과 동일한 운전 조건하에서 1800초 동

안 수행하였다.

실험 조건(3)은 미세공의 직경과 깊이가 각각 100 μm, 30 μm이고 면적 밀도가 20%인 경우에 대해서 상대 운동 속도는 0.05 m/s로 동일하게 한 후 수직 하중이 6.38 N(0.65 kgf), 29.43 N(3 kgf), 49.05 N(5 kgf)의 3가지 경우에 대해서 1800초 동안 수행하였다. 이때 각 하중 조건에 대한 마찰면의 평균 면압은 6.38 N의 경우는 422 MPa이고 29.43 N의 경우는 703 MPa, 49.05 N의 경우는 833 MPa이다.

실험 조건(4)는 상대 운동 속도 변화에 따른 영향을 알아보기 위한 실험으로 실험 조건(3)과 동일한 미세공의 직경, 깊이, 면적 밀도 조건에 대해서 수직 하중은 29.43 N으로 동일하게 한 후 상대 운동 속도를 0.02 m/s, 0.05 m/s, 0.1 m/s, 0.5 m/s의 4가지 경우에 대해서 실험을 수행하였다. 이때 각 실험 조건마다 상대 운동 속도가 다르기 때문에 이전 실험 조건에서 설정한 실험 시간인 1800초를 마찰 거리로 환산한 90 m를 기준으로 하여 실험을 수행하였다.

2-4. 실험 방법

실험에 앞서 시편의 표면에 잔존하는 불순물을 제거하기 위해 텍스처링 가공과 건식연마 등의 표면 처리가 끝난 디스크 시편을 에탄올을 이용하여 20초 동안 초음파세척을 한다. 그 후 다시 에탄올로 디스크 시편과 볼 시편을 세정한 후 상온에서 20분 이상 건조시킨다. 건조된 볼 시편과 디스크 시편 각각을 토크암의 볼 시편 홀더와 구동부에 장착한다. 볼 시편이 장착된 토크암을 직선 운동 베어링 안내 축에 끼워 넣는다. 무게 추를 이용하여 볼 시편과 디스크 시편이 접촉한 마찰면에 수직하중을 가한 후 아크릴 덮개를 덮고 온도계와 습도계를 통해서 환경 조건을 점검한다. 만일 온도 및 습도가 실험 조건으로 설정한 범위 밖으로 넘게 되면 온풍기, 가습기, 실리카겔 등을 사용하여 환경 조건을 조절한다. 디스크 시편과 볼 시편을 접촉시킨 후 2분 30초가 지나면 모션 컨트롤러와 서보 드라이브, 서보 모터를 이용하여 디스크 시편과 볼 시편을 일정한 속도로 상대 운동시킨다. 모든 실험에서 디스크 시편과 볼 시편의 접촉에 의한 영향을 동일하게 하기 위해서 두 시편의 접촉 시간을 2분 30초로 하였다.

실험 조건에서 설정한 시간 또는 마찰거리 동안 상대 운동을 유지시키면서 로드셀에서 출력되는 전압을 DAQ pad를 이용하여 수집한다. 이때 sampling rate은 초당 500개의 데이터가 수집되도록 설정한다. 실험이

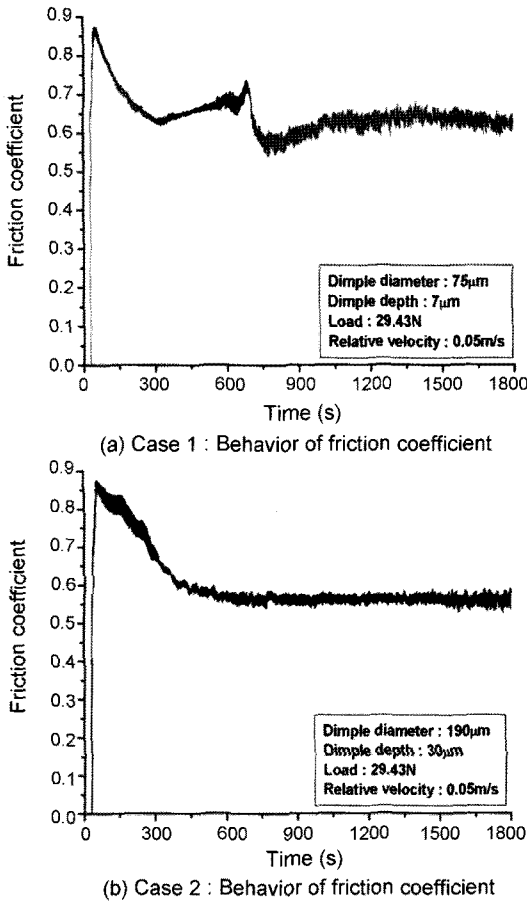


Fig. 2. Representative behavior of friction coefficient with time.

끝나면 디스크 시편과 볼 시편을 분리시킨 후 광학 현미경을 이용하여 마찰면을 관찰한다. 각각의 실험에 대해서 위의 과정을 반복 수행한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 미세공의 직경 및 깊이 변화에 따른 마찰 특성

3-1-1. 마찰 거동 및 마찰 계수

미세공의 직경과 깊이의 변화에 따른 마찰 특성에 대한 실험의 마찰 거동은 Fig. 2와 같은 두 가지 경향을 보였다. 첫째, 미끄럼 발생 후 마찰력이 급격히 증가하였다가 점차 감소한 후 또 다시 증가한 뒤 감소하여 정상 상태를 유지하는 경우와 둘째, 미끄럼 발생 후 마찰력이 급격히 증가 하였다가 점차 감소한 후 정상 상태를 유지하는 경우이다. 두 마찰 거동 모두에서 관찰 되는 실험 초기 마찰 계수의 급격한 상승은 두

시편의 표면 미세 돌기들의 접촉에 의해서 발생한 표면 미세 돌기들의 변형에 의한 영향과 두 시편 중 상대적으로 더 경한 시편인 볼 시편의 표면 미세 돌기에 의한 쟁기질 효과의 영향 그리고 두 시편 표면에 형성되어 있던 산화막의 파괴로 인하여 발생된 깨끗한 표면에서의 응착의 증가가 복합적으로 발생하였기 때문인 것으로 판단된다[8].

실험초기 상대 운동 발생 후 마찰계수가 급격히 증가한 이후에 다시 감소하는 이유는 두 시편의 표면 미세 돌기들이 점차 제거되어 경면(mirror finish)이 형성되고 그 결과 앞서 마찰 계수의 급격한 증가에 영향을 주었던 3가지의 마찰 성분들 중에서 표면 미세 돌기들의 변형에 의한 영향과 쟁기질 효과의 영향이 줄어들기 때문인 것으로 판단된다. 또한 마모 입자에 의한 쟁기질 효과의 영향도 표면이 경화되어 표면에 고착되지 않기 때문에 마찰 계수는 점차 감소하는 것으로 생각된다.

마찰 계수가 한번의 증가와 감소를 반복한 그 이후에 발생하는 마찰 계수의 증가와 감소는 마찰면에서 발생한 마모 입자의 생성과 이탈 때문인 것으로 판단된다[8].

본 연구에서 마찰 계수는 볼 시편과 디스크 시편 사이에 상대 운동 발생 후 마찰력이 거의 일정해지는 정상 상태에서의 마찰 계수를 취하였다. Fig. 3은 미세공의 직경 및 깊이 변화에 대한 실험 결과로부터 구한 마찰 계수를 비교한 그래프이다. 이때 그래프에 표시된 오차막대는 실험 결과의 최대값과 최소값을 의미한다. Fig. 3의 결과로부터 텍스처링 가공한 경우가 텍스

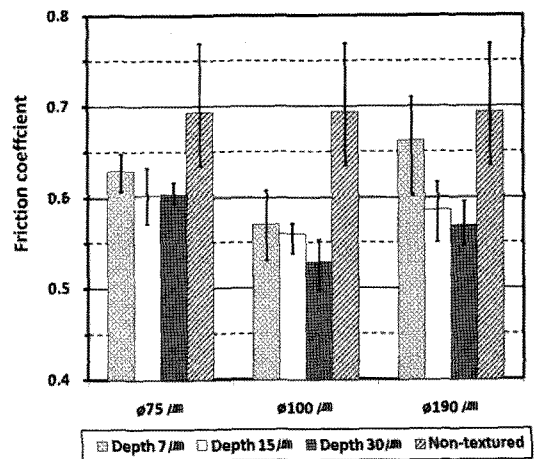


Fig. 3. Comparison of friction coefficient according to dimple depth at each dimple diameter.

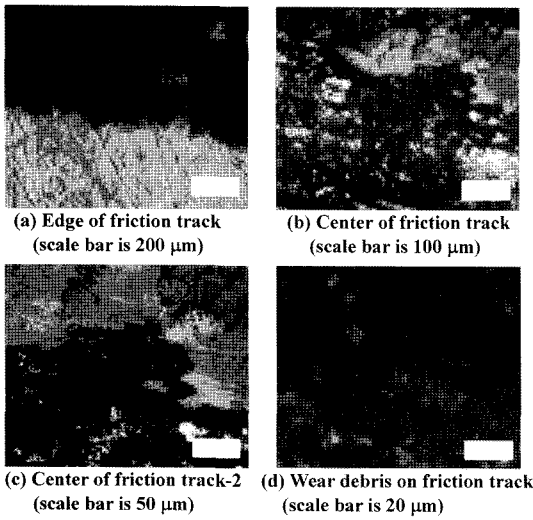


Fig. 4. Microscope images of non-textured surface after test.

처링 가공을 하지 않은 경우보다 전체적으로 마찰 계수 값이 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 마찰면에서 발생한 마모 입자가 미세공 내부에 구속되어 연삭 마찰 성분을 감소 시켰기 때문인 것으로 판단되며 이는 마찰 표면 관찰 결과에 대한 3.1.2절을 통해서 확인할 수 있다.

또한 Fig. 3로부터 본 연구에서 실험한 모든 깊이 조건에서 미세공의 직경이 100 μm일 때 마찰 계수가 제일 작은 것을 알 수 있으며, 동일한 직경 조건에서는 미세공의 깊이가 깊을수록 마찰 계수가 작아지는 경향이 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 마찰면에서 발생한 마모 입자들이 미세공의 깊이가 깊을수록 미세공 내부에 더 많이 구속되기 때문인 것으로 판단된다.

3-1-2. 마찰 표면 관찰

Fig. 4는 텍스처링 가공을 하지 않은 표면에 대한 마찰 실험 후 광학 현미경으로 표면을 관찰한 사진으로 마찰면에 갈색의 마모 입자들이 많이 분포 되어있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 마찰 계수가 제일 작았던 경우인 직경 100 μm, 깊이 30 μm의 미세공을 텍스처링 가공한 표면의 실험 후 사진이다. 앞서 텍스처링 가공을 하지 않은 표면과는 다르게 마모 입자들이 미세공과 미세공 사이의 표면에서 거의 보이지 않고 미세공 내부에 구속 되어있는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 텍스처링 가공된 시편 중 마찰 계수가 제일 큰 경우인 직경 190 μm, 깊이 7 μm의 미세공을 텍스처링 가공한 표면의 실험 후 사진이다. Fig. 4의 경우

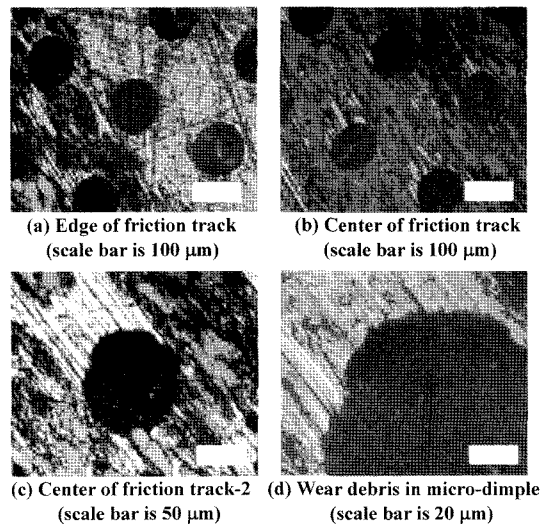


Fig. 5. Microscope images of textured surface after test (micro-dimple diameter : 100 μm & depth : 30 μm).

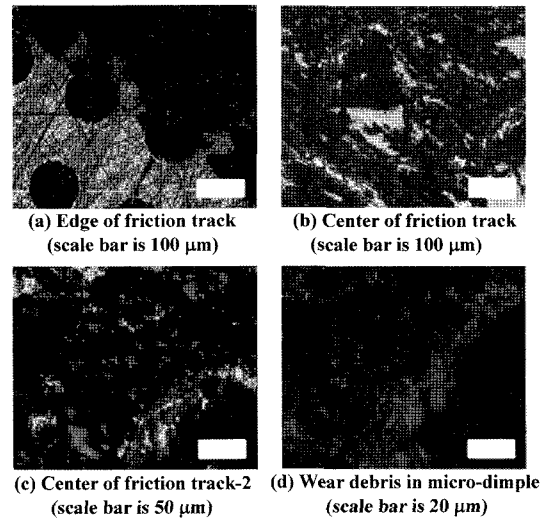
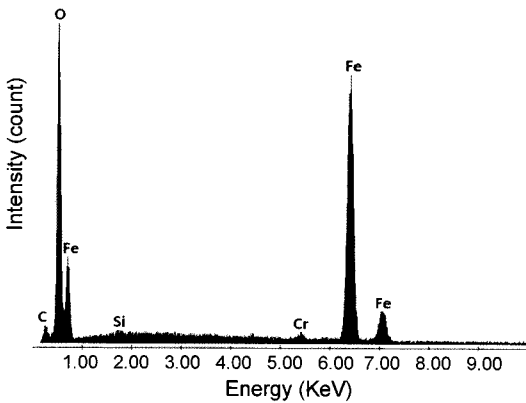
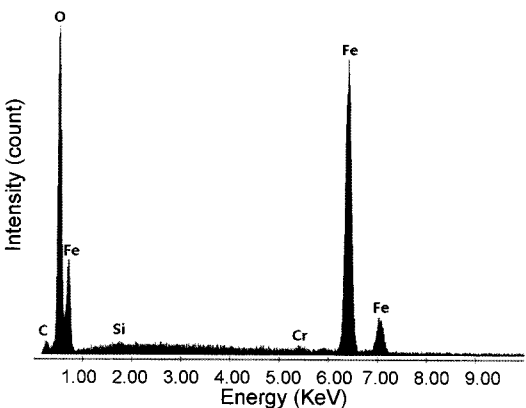


Fig. 6. Microscope images of textured surface after test (micro-dimple diameter : 190 μm & depth : 7 μm).

처럼 미세공과 미세공 사이의 표면에 갈색의 마모 입자들이 많이 남아있는 것을 확인할 수 있다. 또한 미세공 내부에도 갈색의 마모 입자들이 구속되어 있는 것을 확인할 수 있다. 마모 입자들이 미세공 내부에 구속되어 있음에도 불구하고 미세공과 미세공 사이의 표면에서 마모 입자들이 관찰된 이유는 가공된 미세공의 깊이가 상대운동 중 발생한 마모 입자들을 모두 구속 시키기에 충분히 깊지 않았기 때문인 것으로 판단되며 그 결과 텍스처링 가공을 하지 않은 표면과 거의 같은 크기의 마찰 계수를 보인 것으로 생각된다. 실험 후



(a) EDS analysis of wear particles on the surface of disk specimen after test



(b) EDS analysis of wear particles in micro dimple on the friction track surface of disk specimen after test

Fig. 7. EDS analysis of wear particles after test.

미세공과 미세공 사이의 표면에 마모 입자가 남아 있었던 경우가 그렇지 않았던 경우보다 마찰 계수 값이 큰 것을 알 수 있다. 따라서 마찰면 사이에 존재하는 갈색의 마모 입자가 마찰 계수에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3-1-3. 마모 입자의 성분 분석

실험 후 디스크 시편의 마찰트랙에서 이탈된 마모 입자와 마찰트랙 내부의 미세공에 구속되어있는 마모 입자에 대해서 EDS 분석을 하였다.

Fig. 7은 분석 결과로서 마모 입자들의 성분은 철(Fe), 산소(O), 탄소(C), 규소(Si), 크롬(Cr)등의 원소들로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 볼 시편과 디스크 시편의 재질인 SUJ2 베어링 강과 SM45C 기계구조용 탄소강의 화학 성분(Table 2 참고)을 바탕으로 볼 때 마찰 면에서 생성된 마모 입자는 외부로부터

Table 2. Chemical composition of disk & ball specimen

(wt, %)				
C	Si	Mn	P	S
0.42~0.48	0.15~0.35	0.60~0.90	less than 0.030	less than 0.035
(a) Disk specimen(SM45C)				
(wt, %)				
C	Si	Mn	P	S
0.95~1.10	0.15~0.35	0.20~0.50	less than 0.025	less than 0.020
(b) Ball specimen(SUJ2)				

유입된 제3의 물질에 의해서 생성되지 않고 볼 시편과 디스크 시편의 두 시편으로부터 마찰로 인해 생성된 것임을 알 수 있다. 또한 마찰트랙에서 이탈된 마모 입자와 미세공 내부에 구속된 마모 입자의 성분이 동일한 것으로 보아 마찰면에서 생성된 마모 입자가 상대 운동이 발생하면서 미세공 내부에 구속되는 것을 알 수 있다.

3-2. 미세공의 직경 및 면적 밀도 변화에 따른 마찰 특성

3-2-1. 마찰 거동 및 마찰 계수

미세공의 직경 및 면적 밀도 변화에 따른 마찰 특성에 대한 실험 결과로부터 관찰되는 마찰 거동은 앞서 Fig. 2와 같은 2가지 경우가 있었다. 이러한 마찰 거동의 이유는 앞서 수행했던 미세공의 직경 및 깊이 변화 조건의 실험에서 설명한 것과 같은 이유인 것으로 판단 된다.

Fig. 8은 미세공의 직경 및 면적 밀도 변화에 대한

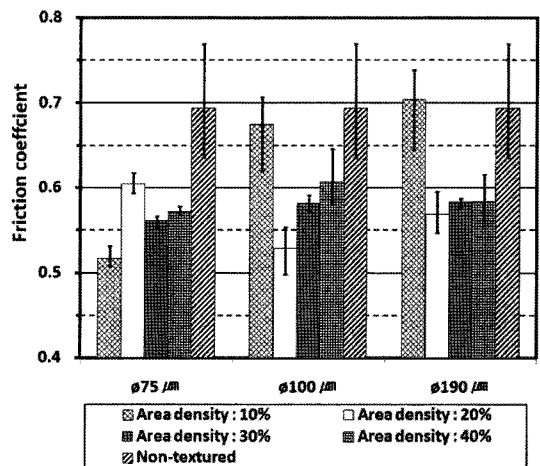


Fig. 8. Comparison of friction coefficient according to area density of dimple at each dimple diameter.

마찰 계수를 비교한 그래프이다. 이때 그래프에 표시된 오차막대는 실험 결과의 최대값, 최소값을 의미한다. 미세공의 직경이 75 μm 일 때는 미세공의 면적 밀도가 10% 일 때 마찰 계수가 가장 작았고 그 이상의 면적 밀도 조건에서는 마찰 계수가 증가하였다. 미세공의 직경이 100 μm , 190 μm 일 때는 미세공의 면적 밀도가 10%일 때 마찰 계수가 가장 큰 값을 보였고 20% 일 때 마찰 계수가 가장 작았으며 그 이상의 면적 밀도 조건에서는 마찰 계수가 증가하였다. 이를 통해서 각각의 미세공의 직경 조건에서 마찰 계수가 최소가 되기 위한 최적의 미세공의 면적 밀도 조건이 존재하는 것을 알 수 있다. 또한 마찰 계수가 제일 작을 때의 미세공의 면적 밀도 조건보다 더 큰 면적 밀도 조건에서는 마찰 계수가 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

3.3. 수직 하중 변화에 따른 마찰 특성

3-3-1. 마찰 거동 및 마찰 계수

수직 하중 변화에 따른 마찰 특성에 대한 실험에서 마찰 계수가 정상 상태에 이르기까지의 마찰 거동은 앞서 수행했던 실험들과 같은 2가지 경우 즉, 두 시편 사이에 상대 운동 발생 후 마찰력이 급격히 증가하였다가 점차 감소한 후 또 다시 증가한 뒤 일정해지는 경우와 미끄럼 발생 후 마찰력이 급격히 증가 하였다가 점차 감소한 후 일정해지는 경우가 있었다.

Fig. 9는 수직 하중 변화에 대한 정상 상태에서의 마찰 계수를 비교한 그래프이다. 이때 그래프에 표시된 오차막대는 마찰 계수의 최대값과 최소값을 의미한다. Fig. 9를 통해서 수직 하중이 증가 할수록 마찰

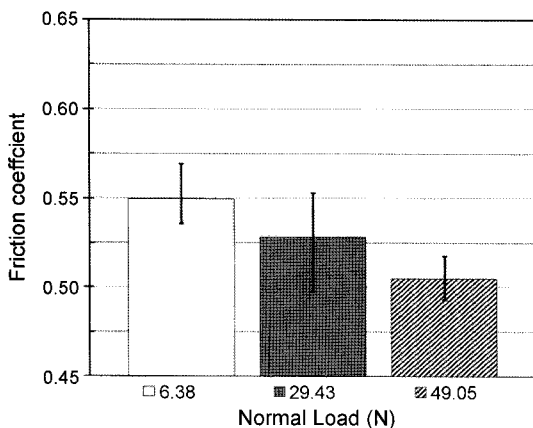


Fig. 9. Comparison of friction coefficient according to normal load.

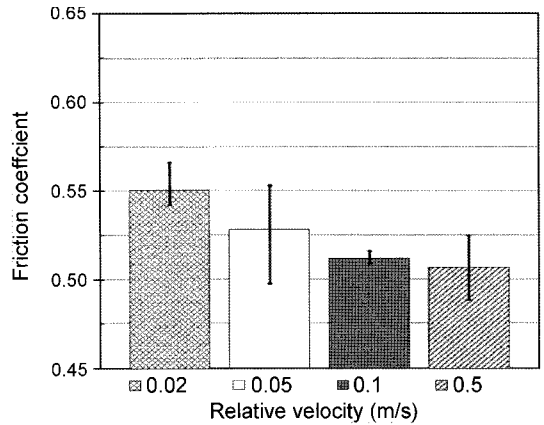


Fig. 10. Comparison of friction coefficient according to relative velocity.

계수가 작아지는 경향이 있음을 알 수 있다. 그 이유는 수직 하중이 증가 할수록 진실 접촉면적은 증가하게 되고 이로 인해 마찰면에서의 마찰력은 증가한다. 마찰력의 증가는 마찰력과 속도의 곱(FV factor)인 동력(power)을 증가시켜 마찰면의 온도를 상승시킨다[9]. 그 결과 마찰 표면의 표면 미세 돌기들 사이에 형성된 접촉면에서의 전단강도가 낮아져 마찰 계수가 낮아지는 것으로 판단 된다.

3.4. 상대 운동 속도 변화에 따른 마찰 특성

3-4-1. 마찰 거동 및 마찰 계수

상대 운동 속도 변화에 따른 마찰 특성에 대한 실험에서 마찰 계수가 정상 상태에 이르기까지의 마찰 거동은 앞서 수행했던 모든 실험과 거의 동일하였다.

Fig. 10은 상대 운동 속도 변화에 대한 마찰 계수를 비교한 그래프이다. 이때 그래프에 표시된 오차막대는 마찰 계수의 최대값과 최소값을 의미한다. Fig. 10을 통해서 상대 운동 속도가 증가할수록 마찰 계수가 작아지는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는 상대 운동 속도가 증가함에 따라 마찰력과 속도의 곱(FV factor)인 동력(power)이 증가되어 수직 하중 증가 실험의 경우와 마찬가지로 마찰면의 온도가 상승하게 된다. 그 결과 마찰 표면의 표면 미세 돌기들 사이에 형성된 접촉면의 전단강도가 낮아지게 되므로 마찰 계수가 낮아지는 것으로 판단된다[9].

4. 결 론

본 연구에서는 텍스처링 가공으로 미세공이 가공된

표면에 대해 건조 마찰 상태에서의 마찰 실험을 통해서 미세공의 직경, 깊이, 면적 밀도의 변화가 마찰 거동에 미치는 영향과 수직 하중 및 상대 운동 속도의 변화에 따른 미세공이 가공된 표면의 마찰 거동에 대한 연구를 수행하였다. 실험 결과를 통해서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 건조 마찰 상태에서 텍스처링 가공을 통해 표면에 미세공이 가공된 경우가 표면에 아무런 가공을 하지 않은 경우보다 마찰 계수가 더 낮았다.

2. 본 연구에서 주로 관찰 되는 마찰 거동은 다음과 같은 2가지 경우가 있었다.

첫째, 미끄럼 발생 후 마찰력이 급격히 증가하였다가 점차 감소한 후 또 다시 증가한 뒤 감소하여 정상 상태를 유지하는 경우

둘째, 미끄럼 발생 후 마찰력이 급격히 증가하였다가 점차 감소한 후 정상 상태를 유지하는 경우

3. 건조 마찰 상태에서 미세공의 직경 조건이 동일한 경우 미세공의 깊이가 깊을수록 마찰 계수가 낮아지는 경향이 있었다.

4. 마찰 계수가 최소가 되기 위한 미세공의 면적 밀도 조건은 미세공의 직경 조건에 따라서 달랐다. 미세공의 직경이 75 μm 인 경우는 미세공의 면적 밀도가 10%일 때 다른 면적 밀도 조건에 비해 마찰 계수가 가장 작았으며, 미세공의 직경이 100 μm , 190 μm 인 경우는 미세공의 면적 밀도가 20%일 때 마찰 계수가 가장 작았다.

5. 수직 하중 및 상대 운동 속도가 증가할수록 마찰 계수가 감소하는 경향이 있었다.

후 기

이 논문은 2009년도 BK21 사업에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

1. N. P. Suh, M. Mosleh and P. S. Howard, "Control of Friction", *Wear*, Vol. 175, pp. 195-202, 1994.
2. I. Etsion, "State of the Art in Laser Surface Texturing", *Journal of Tribology*, Vol. 127, pp. 248, 2005.
3. I. Etsion, Y. Kilgerman and G. Halperin, "Analytical and Experimental investigation of Laser-textured mechanical seal faces", *Tribology Transactions*, Vol. 42, pp. 511-516, 1999.
4. I. Etsion and G. Halperin, "A Laser Surface Textured Hydrostatic Mechanical Seal," *Tribology Transactions*, Vol. 45, pp. 430-434, 2002.
5. G. Ryk and Y. Kilgerman, "Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components," *Tribology Transactions*, Vol. 45, pp. 444-449, 2002.
6. M. Wakuda, et al., "Effect of Surface Texturing on Friction Reduction Between Ceramic and Steel Materials Under Lubricated Sliding Contact," *Wear*, Vol. 254, pp. 356-363, 2003.
7. X. Wang and K. Kato, "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. 36, pp. 189-197, 2003.
8. N. P. Suh and H. C. Sin, "The Genesis of Friction," *Wear*, Vol. 69, pp. 91-114, 1981.
9. 이기현, "질화규소 세라믹스의 마찰 및 마모 거동에 관한 연구", 한국과학기술원 박사학위논문, 1994.