

# 딴플 패턴이 있는 실리콘 표면의 마찰특성

## Frictional Characteristics of Silicon Surface with Micro-dimple Pattern

유신성<sup>1</sup>, 허윤영<sup>2</sup>, 김대은<sup>1,✉</sup>

Shin Sung Yoo<sup>1</sup>, Yoon-Young Heo<sup>2</sup>, and Dae-Eun Kim<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 연세대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.)

<sup>2</sup> 연세대학교 무한내마모연구단 (Center for Nano-Wear, Yonsei Univ.)

✉ Corresponding author: kimde@yonsei.ac.kr, Tel: +82-2-2123-2822

Manuscript received: 2014.3.10 / Revised: 2014.4.17 / Accepted: 2014.4.21

*Surface roughness of mechanical components is an important factor which affects the tribological phenomena. Various surface patterns have been applied to surfaces to improve the tribological characteristics of mechanical components. In this work, the friction reduction effect of micropatterns on silicon was investigated. For this purpose, micro-dimple patterns were fabricated on silicon wafer by DRIE process. In the friction experiments silicone oil was used as lubricant. Also, the lubricant was cleaned to simulate a lubricant depleted condition. In depleted lubricated condition, friction coefficient of micro-pattern specimens was lower than specimens without micro-patterns. It was found that friction reduction effect of micro-pattern could be successfully maintained even after cleaning the lubricant on the surface.*

Key Words: Friction Reduction (마찰 저감), Silicon Surface (실리콘 표면), Silicone Oil Lubricant (실리콘 오일 윤활제), Micro-dimple Pattern (마이크로 딴플 패턴)

### 1. 서론

기계부품의 표면조도는 마찰 현상에 중요한 영향을 미친다. 일반적으로 높은 표면조도를 가지는 상대면은 접촉하는 면의 돌기와 기계적 충격을 발생시키기 때문에 높은 마찰 계수를 나타낸다. 다른 한편으로 매우 매끈한 표면은 접촉면의 돌기의 기계적 충격은 최소화시킬 수 있지만, 표면 간의 접촉력이 높아질 수 있기 때문에 마찰 계수가 높아질 수 있다. 예를 들면 하드디스크에 사용되는 디스크는 매우 낮은 표면 조도를 가지고 있기 때문에 하드디스크 슬라이더와 접촉하는 정지 상태에서 높은 점착력을 가지게 되고 이는 하드디스크 구동시 높은 마찰계수를 보이게 된다. 이를 방지하기 위해서 하드디스크 슬라이더가 정지하는 랜

딩존에 인위적으로 돌기를 표면에 제작하여서 하드디스크 슬라이더와 디스크 간에 발생하는 점착력을 최소화시키는 기술이 적용되고있다.<sup>1-3</sup> 돌기와 반대로 표면에 딴플을 제작하여 표면의 마찰, 마모 특성을 향상시키기 위한 연구도 진행되어왔다. 이와 같은 마이크로 패턴 표면은 윤활제를 사용하지 않는 건식 미끄럼을 경험하는 기계부품에 적용할 경우 마찰과 마모를 증가시키는 마모 입자를 포집하여서 마찰과 마모를 저감하는 역할을 수행할 수 있다.<sup>4</sup> 윤활제를 사용하는 경우 마이크로 패턴은 elasto-hydrodynamic 또는 hydrodynamic 윤활 조건에서 접촉면의 압력 구배에 변화를 주어서 윤활 효과를 높일 수 있으며 경계 윤활 조건에서 마찰력을 낮추는 역할을 한다.<sup>5,6</sup> 이와 같이 다양한 형상의 마이크로 패턴이 표면의 마찰, 마모 특성

을 향상시키기 위하여 연구되어 왔다.<sup>7-9</sup>

본 연구에서는 딩플이 가지는 표면의 마찰, 마모 특성 향상 기능의 신뢰성을 확인하기 위하여 윤활제가 제거되는 가혹 환경에서 낮은 마찰계수를 유지하기 위한 마이크로 패턴의 윤활제 저장 효과에 관한 연구를 수행하였다.

**2. 실험 장치 및 시편**

마이크로 패턴은 실리콘 웨이퍼 위에 MEMS 공정을 이용하여 제작되었다. 마이크로 패턴을 제작할 수 있는 마스크를 설계하고 MEMS (micro electro mechanical systems) fabrication 중 DRIE (deep reactive-ion etching) 공정을 이용하여 Fig. 1과 같이 수직 홈을 가공하였다. 딩플 패턴은 지름은 20 $\mu$ m 이고 딩플 간의 간격은 40 $\mu$ m로 제작되었다. 전체 면적 중 딩플 홈의 면적 비율은 참고 문헌 5의 결과를 참고로 5~20% 사이 값 중 8.7%을 선택하여 제작되었다. 제작된 딩플의 깊이는 50 $\mu$ m로 윤활제를 충분히 저장할 수 있도록 가공하였다.

마이크로 홈에 윤활제 저장을 원활하게 하기 위해서 상온에서 50 cSt의 동점도를 가지는 저점도 실리콘 오일을 윤활제로 선정하였다. 선정된 실리콘 오일은 linear 타입의 polydemethylsiloxane으로 300 $^{\circ}$ C 이상의 높은 발화점을 가지며 화학적으로 안정적인 물질이다. 딩플 패턴이 있는 실리콘 웨이퍼에 대해서 Fig. 2(a)와 같이 윤활제가 없는 시편, Fig. 2(b)와 같이 윤활제를 도포한 시편, Fig. 2(c)와 같이 윤활제를 도포 후 표면의 윤활제를 닦아낸 시편, 3가지 경우에 대해서 실험을 진행하였다. 비교를 위해 마이크로 패턴이 없는 실리콘 웨이퍼 시편에 대해서도 실험을 실시하였다. 윤활제는 약 25 ml의 실리콘 오일을 10 mm  $\times$  10 mm 크기의 실리콘 웨이퍼 위에 떨어뜨려 균일하게 도포하였고 윤활제 제거는 클린 부스용 와이퍼를 이용하여 현미경으로 표면의 윤활제 제거 상태를 관찰하면서 충분히 닦아내는 방법을 사용하였다. 마찰 실험은 Fig. 3과 같이 1.6 mm 지름의 stainless steel ball에 350 mN 수직 하중을 가하여 경계윤활 조건에서 실시되었다. 리니어 액츄에이터를 이용한 왕복운동 실험장치로 5 mm 거리를 5 mm/s속도로 150 cycle씩 각각 3번 반복 실험을 진행하였다. 실험은 온도 26 $^{\circ}$ , 습도 34% 환경에서 수행되었다.

실험 조건에서의 Hertzian contact pressure와 Hertzian contact radius 는 각각 670 MPa과 15.8  $\mu$ m

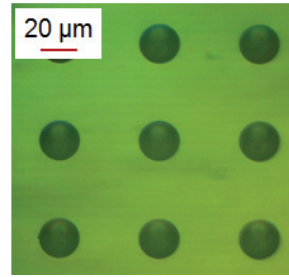


Fig. 1 Micro-pattern on silicon wafer

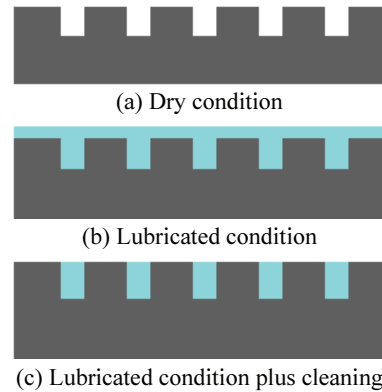


Fig. 2 Schematic of micro patterned specimens

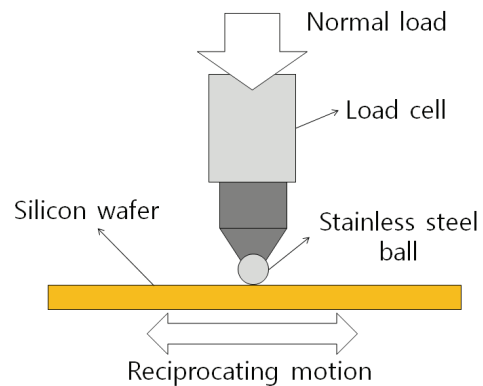


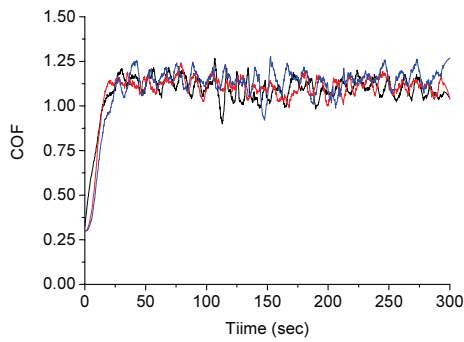
Fig. 3 Experimental set-up

로 계산되었다. 계산된 Hertzian contact radius는 딩플 반지름의 약 1.5배 크기를 가진다.

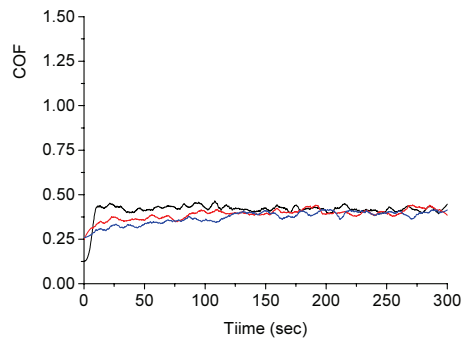
**3. 실험 결과**

**3.1 마찰 실험 결과**

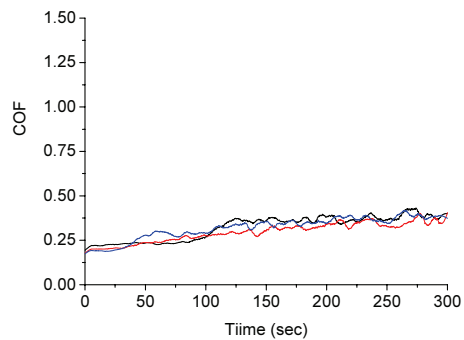
다음 Fig. 4(a)-(c)는 딩플 패턴 시편의 (a) 윤활제가 없는 경우, (b) 윤활제를 도포한 경우, (c) 윤



(a) Dry condition



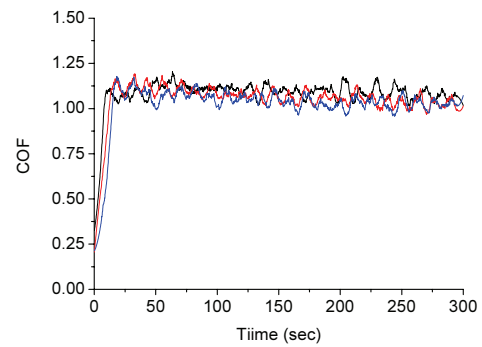
(b) Lubricated condition



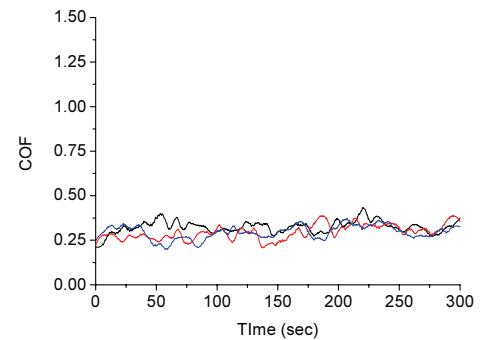
(c) Lubricated condition plus cleaning

Fig. 4 Micro dimple specimens

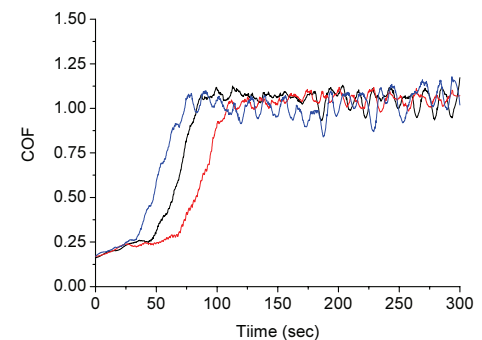
활제를 닦아낸 경우, 각 시편의 마찰 계수를 보여 준다. 평균 마찰계수는 (a) 윤활제가 없는 경우: 1.09, (b) 윤활제를 도포한 경우: 0.39, (c) 윤활제를 닦아낸 경우: 0.31로 측정되었다. Fig. 6(a)~(c)는 딥플이 없는 실리콘 웨이퍼의 (a) 윤활제가 없는 경우, (b) 윤활제를 도포한 경우, (c) 윤활제를 닦아낸 경우, 각 시편의 마찰 계수를 보여준다. 평균 마찰 계수는 (a) 윤활제가 없는 경우: 1.05, (b) 윤활제를 도포한 경우: 0.31, (c) 윤활제를 닦아낸 경우: 0.85로 측정되었다.



(a) Dry condition



(b) Lubricated condition



(c) Lubricated condition plus cleaning

Fig. 5 No dimple specimens

Fig. 6은 두 시편의 마찰 계수의 평균과 표준 편차를 비교한 그래프이다. Fig. 6(a)는 0~300초 전체 구간에 대한 평균과 표준 편차를 그래프로 나타낸 결과이고 Fig. 6(b)는 초기 마찰 계수를 제외한 200~300초 구간 실험 결과에 대한 평균과 표준 편차를 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 딥플 패턴 시편에 윤활제가 없는 경우, 마찰 계수는 초기 0.27에서 시작해서 10 cycle 이내에 급격히 증가 마찰 계수가 1.1에 도달함을 알 수 있다. 윤활제가 도포된

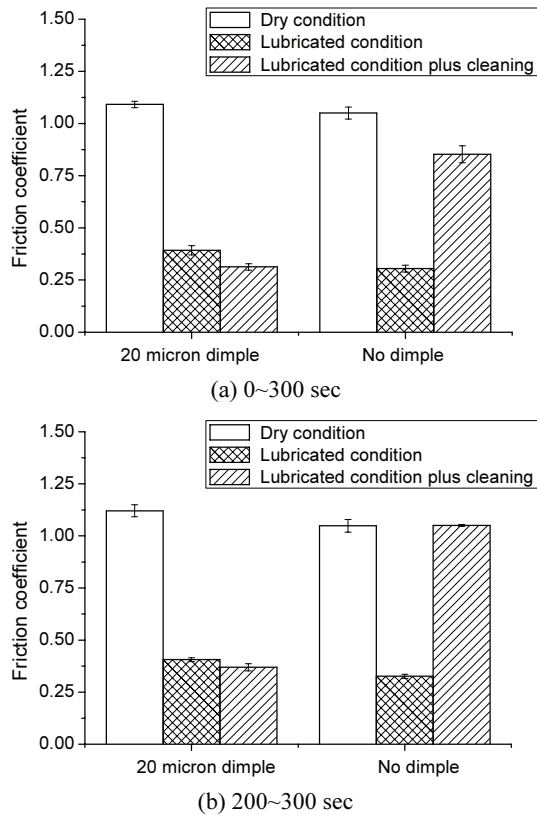


Fig. 6 Compare of average friction coefficient data

경우에도 초기 마찰계수는 0.12에서 0.25 범위의 값을 가지지만 10 cycle 이내에 0.4의 마찰 계수값에 도달함을 알 수 있다. 두 시편의 경우, 본 실험 조건에서 10 cycle 이내에 시편 표면에 파손이 발생함을 알 수 있다. Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 윤활제를 도포한 경우, 윤활제를 닦아낸 경우 보다 높은 마찰 계수 값을 보였는데 이는 두껍게 도포된 윤활제의 점도 효과에 의해 마찰력이 증가한 것이다.<sup>10,11</sup> 이러한 현상은 Fig. 5(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 딤플이 없는 실리콘 시편에도 동일하게 나타났다.

하지만 윤활제를 닦아낸 시편의 경우, 딤플이 있는 시편의 마찰 계수와 딤플이 없는 시편의 마찰 계수는 확연하게 다른 경향을 나타내었다. Fig. 5(c)에서 볼 수 있듯이 딤플이 없는 시편으로 수행된 윤활제를 닦아낸 실험의 경우, 마찰 계수는 점차적으로 증가하여 50 cycle 이후 Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이 윤활제가 없는 시편과 비슷한 마찰 계수를 나타내었다. 딤플이 있는 시편으로 수행된

Table 1 Compare of average friction coefficient data

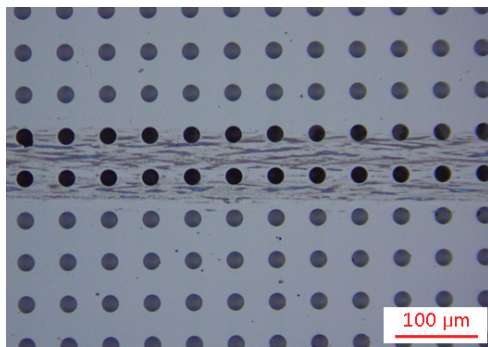
| COF        | 20 micron dimple |      |             | No dimple |      |             |
|------------|------------------|------|-------------|-----------|------|-------------|
|            | Dry              | Lub. | Lub.+ clean | Dry       | Lub. | Lub.+ clean |
| Fig. 7 (a) | 1.09             | 0.39 | 0.31        | 1.05      | 0.31 | 0.85        |
| Fig. 7 (b) | 1.12             | 0.41 | 0.37        | 1.04      | 0.32 | 1.05        |

윤활제를 닦아낸 실험의 경우, Fig. 4(c)에서 볼 수 있듯이 마찰 계수가 낮게 유지되면서 윤활제를 도포한 시편 보다도 낮은 마찰 계수를 나타냈다. 이는 표면에 윤활제가 제거된 시편의 경우, 시편과 볼이 상대 운동 하면서 딤플에 저장된 윤활제가 접촉면에 공급되었음을 보여준다.

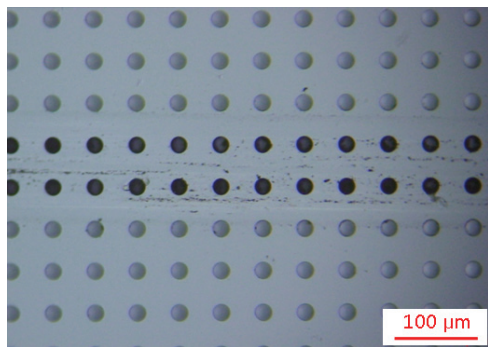
Table 1에서 딤플 패턴이 있는 시편의 평균 마찰 계수와 딤플 패턴이 없는 시편의 평균 마찰 계수를 비교해보면 딤플 패턴이 있는 시편이 딤플 패턴이 없는 시편보다 에서 무윤활 조건에서는 0.04, 윤활 조건에서 0.08 높게 측정되었다. 이는 볼과 딤플 패턴의 모서리와 물리적 접촉에 의해서 마찰 계수가 증가한 결과로 보인다. 기존 연구 결과를 보면 딤플의 크기가 접촉면적의 크기 보다 큰 경우 윤활 조건에서 딤플 패턴이 최적의 마찰 저감 효과를 나타낸다<sup>5</sup>. 본 실험 조건에서 수직 하중이 10 gf 값을 가지면 Hertian contact radius가 10.4  $\mu\text{m}$  로 계산되므로 본 실험에 사용된 20  $\mu\text{m}$  지름의 딤플 패턴의 윤활 조건에서 마찰 저감 효과를 가지기 위해선 10 gf 이하의 수직 하중 조건에서 실험이 수행되어야 할 것이다.

### 3.2 마모 트랙 측정 결과

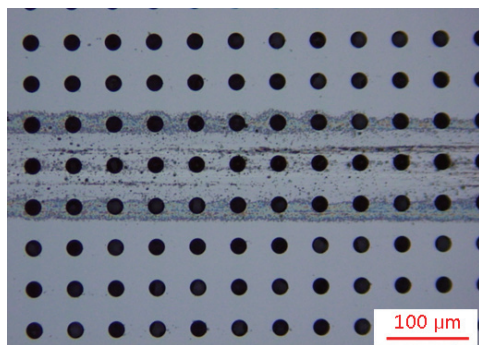
마찰 실험 후 윤활유를 제거하지 않고 마모 현상을 측정하기 위하여 confocal microscope를 이용하여 마모를 측정하였다. SEM (scanning electron microscope)의 경우 높은 배율로 표면 측정이 가능하지만 진공 조건에서 측정을 하기 위해 시편 표면의 윤활유를 제거해야 하고, 3d surface profiler와 같은 probe 방식의 접촉식 표면 측정 장비의 경우 딤플 패턴이 깊이가 폭에 비해 커서 probe가 딤플 홀에 걸릴 경우 센서에 손상이 발생할 수 있다. 측정에 사용된 confocal microscope는 optical image와 laser image를 합성하여서 이론적으로는 광학적으로 측정되는 윤활유의 흔적과 laser focal depth를 이용한 깊이 방향 data를 모두 얻을 수 있지만 본 실험에 사용된 시편의 경우 딤플 홀의 깊이가 폭보다



(a) Dry condition



(b) Lubricated condition

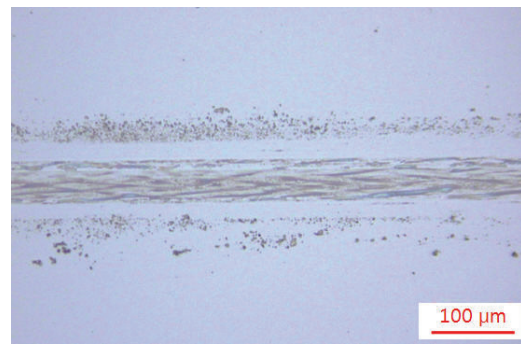


(c) Lubricated condition plus cleaning

Fig. 7 Confocal image of wear track on micro dimple specimen

커서 디플 홀 내부의 3-D 형상은 측정되지 않았다. 또한 실리콘 웨이퍼 표면의 마모 트랙의 깊이가 500 nm 이하로 confocal microscope로 정량적으로 측정이 불가능했기 때문에 표면 2-D 이미지를 통하여 마모 특성을 평가하였다.

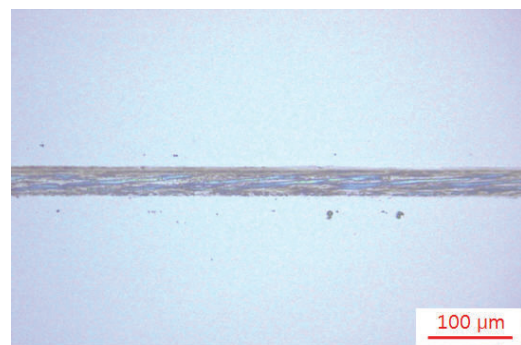
Fig. 7(a)~(c)과 Fig. 8(a)~(c)는 디플 패턴 시편과 디플 패턴이 없는 시편의 경우 각각 (a) 윤활제가 없는 경우, (b) 윤활제를 도포한 경우, (c) 윤활제를 닦아낸 경우, confocal microscope로 측정된 결과 보



(a) Dry condition



(b) Lubricated condition



(c) Lubricated condition plus cleaning

Fig. 8 Confocal image of wear track on no dimple specimen

여준다. 윤활제가 없는 경우, 실리콘 표면에 스테인레스 스틸 볼의 일부가 전이되었음을 표면 색상의 변화로 확인할 수 있다. 마모 트랙의 폭은 디플 패턴 시편과 디플 패턴이 없는 시편 모두 약 100 μm 폭을 나타냈다. 이는 계산된 Hertian contact diameter보다 3배 정도 큰 값으로 Hertian contact 이론은 탄성 영역에서만 적용되기 때문에 마모가 진행되는 본 실험 조건의 마모 트랙은 이론값 보다 크게 측정된 것으로 보인다. 디플 패턴 시편의 경

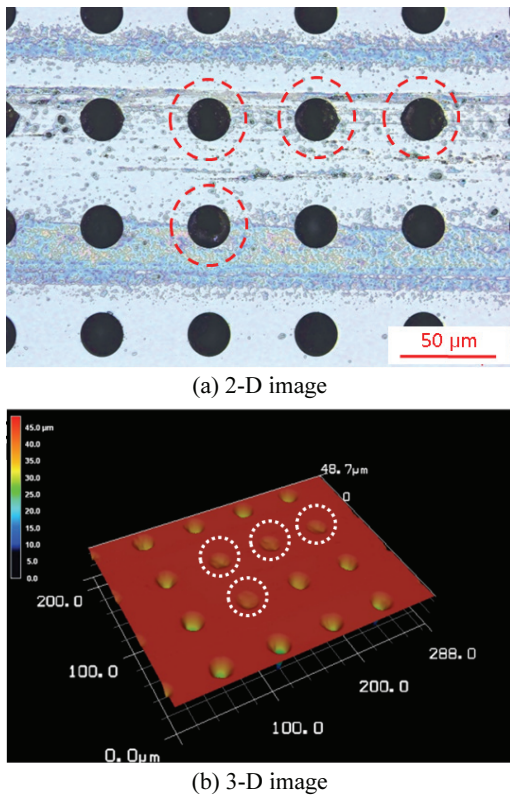


Fig. 9 Confocal image of trapped particles in micro dimple - lubricated condition plus cleaning specimen

우 마모 트랙 전 영역에서 스테인레스 스틸 볼의 전이가 나타났지만 뎀플 패턴이 없는 시편의 경우 60 μm 폭의 마모 트랙에서만 볼 성분의 전이가 발생했다. 이는 뎀플 패턴 시편의 경우 볼과 시편의 높은 압력의 접촉이 더 많이 발생함을 알 수 있다. 윤활제를 도포한 경우, 두 시편 모두 마모 트랙을 명확히 구분하기 어려웠으며 입자 분포로 미루어 보면 마모 트랙 폭은 100 μm 정도로 보인다. 하지만 마모 입자의 분포에서 확인한 차이를 보였다. 뎀플 패턴 시편의 경우, 마모 입자가 마모 트랙 중심에 위치했지만 뎀플 패턴이 없는 시편의 경우 마모 입자가 마모 트랙 주변에 펼쳐진 형태로 분포하였다. 윤활제 도포 후 윤활제를 닦아낸 시편의 경우, Fig. 7(c)와 Fig. 8(c)의 마모트랙 바깥 쪽 표면과 같이 표면의 윤활제의 대부분이 균일하게 제거되었음을 알 수 있다. 윤활제를 닦아낸 시편의 경우 뎀플이 있는 시편과 뎀플이 없는 시편의 마모 트랙 폭은 각각 150 μm와 30 μm로 측정되었

다. 윤활제를 닦아낸 뎀플이 없는 시편 경우에도 표면에 극소량의 윤활제가 남아있어 초기 마찰 계수가 낮게 유지되었기 때문에 마모 트랙이 윤활제가 없는 시편만큼 마모 트랙이 커지지 않을 것으로 보인다. 윤활제를 닦아낸 뎀플 시편의 경우, 상대 운동에 의해 뎀플 패턴 안에 있던 윤활제가 볼과 시편 사이 표면으로 나오면서 마모 트랙 밖으로 까지 흘러나갔음을 표면의 윤활제 분포를 통해 확인할 수 있다. 또한 Fig. 9(a) 2-D image에서 볼 수 있듯이 마모 트랙 안에 위치하는 뎀플 패턴 내부에 마모 입자가 확인되며 3-D image 상으로도 마모 입자가 포집된 뎀플 홈의 깊이가 다른 뎀플 홈에 비해 작게 나타남을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 마이크로 뎀플 패턴을 실리콘 표면에 가공하여 윤활 상태에 따른 마찰특성을 고찰하였다. 무윤활 조건과 윤활 조건에서 뎀플 구조의 마찰 저감 효과와 윤활유가 제거되는 가혹 조건에서 뎀플 구조의 마찰 저감 효과의 신뢰성을 평가를 실시하여 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다.

(1) 윤활유 도포 후 윤활제를 닦아내는 가혹 조건 경우 뎀플 구조가 없는 시편에서는 건식 윤활 조건과 비슷한 마찰 계수가 나타났지만 뎀플 구조를 가지는 시편은 뎀플 구조의 윤활제 공급 효과에 의해 낮은 마찰 계수를 유지할 수 있음을 확인하였다.

(2) 윤활유 도포후 윤활제를 닦아낸 경우 마이크로 뎀플 구조가 마모 입자를 포집하는 기능을 가짐을 확인하였다.

(3) 본 실험 조건에서 건식 윤활 조건과 윤활 조건에서 모두에서 뎀플 구조를 가지는 시편은 뎀플 구조가 없는 시편보다 높은 마찰 계수를 보였다. 이는 볼과 뎀플 패턴의 모서리와 물리적 접촉에 의해서 마찰 계수가 증가한 결과로 보인다.

(4) 실리콘의 경계 윤활 조건에서 보다 우수한 마찰 마모특성을 도출하기 위해서는 마찰 조건에 따른 마이크로 패턴의 최적화가 요구된다.

#### 후기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0018289).

## REFERENCES

1. Baumgart, P., Krajnovich, D., Nguyen, T., and Tam, A., "A New Laser Texturing Technique for High Performance Magnetic Disk Drives," *Magnetics*, Vol. 31, No. 6, pp. 2946-2951, 1995.
2. Lee, S. C., Chung, K. H., and Kim, D. E., "A Study on the Surface Damage between Head/Disk Interfaces by using AFM," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 15, No. 9, pp. 167-174, 1998.
3. Kim, D. E., Chung, K. H., and Cha, K. H., "Tribological Design Methods for Minimum Surface Damage of HDD Slider," *Tribology International*, Vol. 36, No. 4, pp. 467-473, 2003.
4. Kim, D., Cha, K., Sung, I., and Bryan, J., "Design of Surface Micro-structures for Friction Control in Micro-systems Applications," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 1, pp. 495-498, 2002.
5. 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.
6. Pettersson, U. and Jacobson, S., "Influence of Surface Texture on Boundary Lubricated Sliding Contacts," *Tribology International*, Vol. 36, No. 11, pp. 857-864, 2003.
7. Pettersson, U. and Jacobson, S., "Friction and Wear Properties of Micro Textured DLC Coated Surfaces in Boundary Lubricated Sliding," *Proc. of the ASIATRIB International Conference*, Vol. 17, No. 3, pp. 553-559, 2002.
8. Varenberg, M. and Gorb, S. N., "Hexagonal Surface Micropattern for Dry and Wet Friction," *Advanced Materials*, Vol. 21, No. 4, pp. 483-486, 2009.
9. Jung, Y. C. and Bhushan, B., "Contact Angle, Adhesion and Friction Properties of Micro-and Nanopatterned Polymers for Superhydrophobicity," *Nanotechnology*, Vol. 17, No. 19, pp. 4970-4980, 2006.
10. Yoo, S. S. and Kim, D. E., "Friction Reduction Properties of Evaporation Coated Petroleum and Silicone Oil Lubricants," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 30, No. 8, pp. 864-869, 2013.
11. Yoo, S. S. and Kim, D. E., "Minimum Lubrication Technique using Silicone Oil for Friction Reduction of Stainless Steel," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 14, No. 6, pp. 875-880, 2013.