

# 이중 주파수 타원형 진동 궤적법 기반 마이크로 딴플의 마찰계수 및 습윤성 분석

박건철\*, 고태조\*<sup>#</sup>, 쿠르니아완 렌디\*, 아리 사우드\*

\*영남대학교 기계공학부

## Analyzing Friction Coefficient and Wettability of Micro-Dimple Fabricated Using Elliptical Vibration Texturing Method

Gun Chul Park\*, Tae Jo Ko\*<sup>#</sup>, Rendi Kurniawan\*, Saood Ali\*

\*School of Mechanical Engineering, Yeungnam UNIV.

(Received 30 December 2019; received in revised form 19 March 2020; accepted 22 March 2020)

### ABSTRACT

Surface texturing of micro-dimples has been used in many manufacturing industries to reduce friction between two sliding contacted surfaces. Surface texturing decreases the frictional force owing to minimizing of the sliding contact area. In this paper, micro-dimples have been fabricated on an Al6061-T6 surface using a two-frequency elliptical vibration texturing (TFEVT) method. A high-frequency of 18 kHz and low-frequency of 250 Hz were applied to an elliptically-vibrated tool holder. The Stribeck curve was plotted to analyze the friction coefficient trends. Furthermore, the representative wetting index, such as the water contact angle (WCA), was measured by considering the friction coefficient. WCA is associated with micro-dimple density and associated parameters. Consequently, the dimpled surfaces with a low friction coefficient exhibited a relatively high WCA in the feed direction. According to the Stribeck curve, the dimpled surfaces demonstrate superior friction performance for mixed-film lubrication compared to the non-textured surface.

**Key Words :** Texturing(텍스처링), Micro Dimple(마이크로 딴플), Friction Coefficient(마찰계수), Stribeck Curve(스트리벡 곡선), Wettability(습윤성), Water Contact Angle(물 접촉각)

### 1. 서 론

표면 텍스처링은 표면을 제거 및 변형하여 공학적 기능을 가질 수 있도록 표면 패턴을 제작하는 것이다. 대표적으로 엔진 실린더 압축링, Mechanical Seal, Roller Bearing, 임플란트, 선박 스크류 등의 다

양한 생산 제조산업 분야에 적용되어 맞는 표면 사이에서 윤활유 저장역할, 마멸입자들의 포집 및 동압효과를 만든다. 이는 마찰저항을 감소시켜 에너지 효율을 높일 수 있도록 도와준다.

표면 텍스처링을 통해 제작될 수 있는 표면 패턴은 그루브, 메쉬, 딴플, 리블렛 등의 종류가 있다. 그루브, 메쉬, 리블렛의 경우 패턴이 연속적인 모양을 하고 있어 유체압을 충분히 유지할 능력이 적은 반면, 딴플은 패턴간 불연속적인 모양으로 유체압

# Corresponding Author : tjko@yu.ac.kr

Tel: +82-10-3537-2576, Fax: +82-53-810-4627

을 유지시킬 수 있으며 각각의 인접한 딴플은 유체 압을 증가시켜 윤활막이 더 두꺼워지게 만든다. 이는 윤활막의 하중수용능력을 증가시켜 유체윤활영역의 범위를 확장한다<sup>[1]</sup>. 또한 표면 텍스처링은 맞닿는 두 표면 사이의 접촉 면적을 줄여 접착력과 마찰력을 감소시키며 표면 습윤성 성질과도 관련이 있다<sup>[2,3]</sup>.

표면 텍스처링 방법으로는 연삭가공, 레이저 가공, 입자분사가공, 방전가공, 타원궤적 진동절삭을 이용한 방법들이 있다. 이 중 고품위의 가공을 만들 수 있는 절삭 방법인 타원궤적 진동절삭 가공은 공구가 타원궤적을 형성하도록 함으로써 가공시 절삭력과 절삭온도를 감소시키는데 도움을 줄 수 있으며 표면품질도 증진시킨다<sup>[4]</sup>. 또한, 딴플의 출구 및 측면에서의 버(burrs)와 경작현상(ploughing)에 대해 고주파 진동을 부가시킴으로써 가공성을 향상시킬 수 있다<sup>[5]</sup>.

본 연구에서는 타원형 진동 궤적법을 기반으로 고주파수와 저주파수를 동시에 적용하여 Al6061-T6 소재를 PCD 공구를 사용해 마이크로 딴플을 제작하였다. 마이크로 텍스처링은 마찰 및 습윤성과 같은 표면 특성을 변경시킨다<sup>[6]</sup>. 따라서, 마이크로 딴플 성능을 평가하기 위해 미끄럼 속도를 변경함으로써 마찰계수를 측정하였다<sup>[7]</sup>. 또한, 표면 습윤성 분석을 위해 Water Contact Angle(WCA)을 측정하였다<sup>[8,9]</sup>. 딴플 패턴은 CNC 선반의 주축 회전수를 변경함으로써 제작되었고, 다양한 딴플밀도 및 형상 치수를 가진 마이크로 딴플 패턴의 습윤성과 마찰계수와의 상관관계를 분석하였다.

## 2. 마이크로 딴플 표면 제작 및 실험 방법

### 2.1 마이크로 딴플 제작

Fig. 1은 딴플 제작시 사용된 CNC 선반과 실험장비를 보여준다. 초음파 절삭 장비는 고주파 공진주파수와 저주파가 적용되며, 3축 방향 타원형 진동이 발생하는 부품은 PZT 재료로 구성되어있다<sup>[10]</sup>. 고주파에 의해 작동되는 3축 방향의 진폭은 길이방향 1  $\mu\text{m}$ , X방향 굽힘 1.6  $\mu\text{m}$ , Y방향 굽힘 0.8

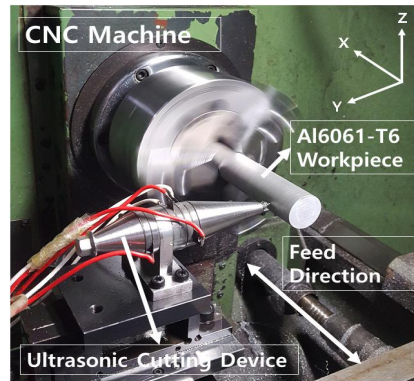


Fig. 1 CNC Machine(DC-2 Daegu Heavy Inc. Co.)

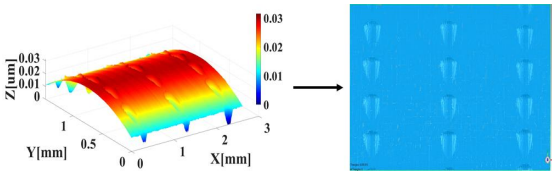
Table 1 Conditions for dimple manufacturing

Workpiece	Al6061-T6	
Tool Type	PCD (poly Crystalline Diamond)	
Low Vibration Frequency	250 Hz	
Low Frequency Amplitude	22.5 $\mu\text{m}$	
3D Resonant Vibration Frequency	18.0 KHz	
Phase Shift(L-Bx-By)	0°, -45°, -90°	
3D elliptical Locus amplitude	Longitudinal	1.0 $\mu\text{m}$
	Bending X	1.6 $\mu\text{m}$
	Bending Y	0.8 $\mu\text{m}$
$\Delta d$ (Tool to Workpiece)	5 $\mu\text{m}$	
Feedrate(mm/rev)	1.0	
rpm	60, 80, 100, 120, 150	

$\mu\text{m}$ 를 발생시킨다. 저주파에 의해 작동되는 변위는 Titanium으로 구성된 원뿔형태의 전방부 질량을 통해 선삭용 PCD 공구 끝단에서 최종 22.5  $\mu\text{m}$  변위로 증폭되어 딴플을 제작할 수 있다. Al6061-T6 피삭재 외경과 공구 끝단의 거리는 5  $\mu\text{m}$ 가 적용되었다. Table 1은 마이크로 딴플 제작조건으로서 250 Hz의 저주파수와 18.0 kHz의 고주파수가 동시에 적용된 초음파 진동 절삭 딴플 제작조건이다. 3축 방향 위상차는 0°, -45°, -90° 이다. 이송속도를 1.0 mm/rev로 고정한 후 CNC 선반 주축 회전수(60, 80, 100, 120, 150 rpm)를 변화시킴으로써 딴플의 밀도를 측정하였다. 딴플 표면 밀도의 변화와 형상치수의 변화에 따라 마찰계수의 경향을 분석하였다<sup>[11,12]</sup>.

**Table 2 Cases of dimple manufacturing**

Feed (mm/rev)	1.0	Rotation speed (rpm)	60	80	100	120	150
Dimple Case	Dimple 1	Dimple 2	Dimple 3	Dimple 4	Dimple 5		
Dimple Density(%)	13.93	12.24	9.43	8.78	7.81		



**Fig. 2 Dimple density measurement. (Matlab software and geomagic studio)**

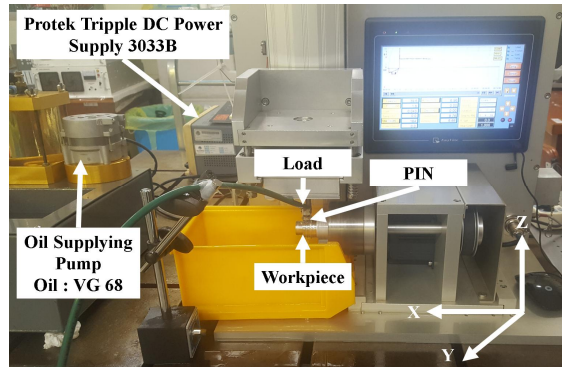
제작된 각각의 피삭재들은 이물질 제거를 위해 Deionized Water에서 30분간 초음파 세척을 하였다. 초음파 세척을 통해 마찰계수 결과의 Noise 값을 줄일 수 있었다.

## 2.2 마이크로 딤플 밀도 측정

Table 2는 CNC 선반 주축 회전수의 변화에 따라 제작된 각각의 딤플에 대한 딤플 밀도의 크기이다. Fig. 2는 딤플 밀도 측정에 사용된 Matlab과 Geomagic Studio 소프트웨어 사진이다. 비접촉식 광학측정기 (NV-2000, Nanosystem사)로 촬영된 딤플사진을 M파일로 변환 후 Matlab Software내의 Surf 함수와 Surf2stl 함수를 사용하여 STL파일로 변환하였다. 변환된 STL파일을 Geomagic Studio 소프트웨어의 면적 계산기능을 사용하여 딤플 밀도를 측정하였다.

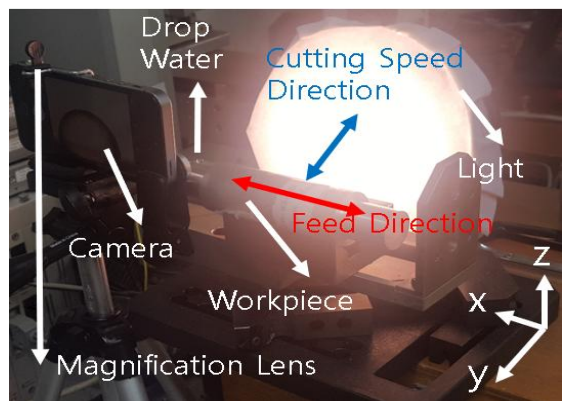
## 2.3 Friction Coefficient 측정 실험

Fig. 3은 마찰실험에 관련된 장비(STM-Smart, 한미산업)를 보여준다. Pin-on-Cylinder 실험에서 상부 시편으로 사용된 핀은 마찰공학에서 일반적으로 사용되는 H<sub>R</sub>C 경도 60을 가지는 베어링강 (AISI 52100)을 사용하였다<sup>[11]</sup>. 핀의 하부표면은 래핑과정을 거쳐 표면거칠기 0.1 ~ 0.2 μm의 값을 가진다<sup>[1]</sup>.



**Fig. 3 Experiment setup**

피삭재 Al6061-T6와 핀의 경우 친수성이 강한 소재이다. 친수성-친수성 재료 마찰시 윤활막을 잘 형성하지 못한다<sup>[13]</sup>. 하지만, 마이크로 딤플이 텍스처링됨으로써 WCA가 증가하게 된다. WCA 값이 증가하면 표면간 접촉력은 감소되며 더 나은 마찰특성을 가진다<sup>[2]</sup>. 이는 텍스처링이 윤활막 형성에 도움이 되며 마찰계수 감소의 결과가 있게 만든다. 하중은 20 N을 적용하였으며, Spindle의 속도는 100~1000 rpm까지 100 rpm간격으로 적용하였다. 윤활유는 공작기계의 안내면 용으로 시판되는 VG68 등급을 사용하였다<sup>[1]</sup>. 윤활유의 동점도계수는 0.0587 kg · m/s이다. 마찰실험은 각 회전수별로 5분 11초씩 진행되었으며, 엑셀 데이터의 평균값과 표준편차값을 도출하였다.



**Fig. 4 Water contact angle measurement experiment setup**

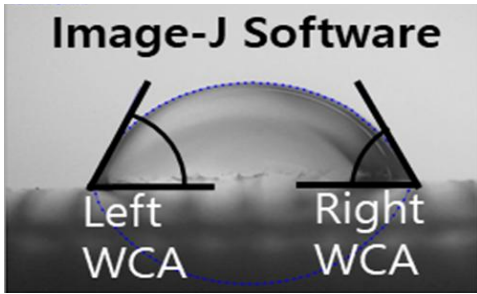


Fig. 5 Image-J software surface WCA

### 2.4 Water Contact Angle 측정 실험

Fig. 4는 WCA 측정을 위한 실험장비를 보여준다. WCA 측정은 이송방향과 절삭방향 2가지 방향에서 측정하였다. 측정에 사용된 장비는 간이형으로 스마트폰 Galaxy-6(Samsung사)를 이용하였으며, 확대 렌즈를 결합하여 촬영하였다. 매 측정시 마다 10  $\mu$ l 용량의 물방울을 사용하였다.

Fig. 5는 Image-J 소프트웨어의 WCA 측정사진이다. 더 나은 분석을 위해 이미지 형태는 8 bit(흑백)로 설정되었으며, 낙하분석 (Drop Analysis) 기능을 통해 WCA가 측정되었다. 본 실험에서는 임의의 표면 10지점을 촬영한 후 이송방향 WCA와 절삭방향 WCA 값의 평균값을 구하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 Stribeck Curve

표면 텍스처링이 윤활영역에 미치는 영향을 조사하기 위해 스트리벡 곡선이 사용되었다<sup>[14]</sup>. Fig. 6은 마찰실험 결과를 스트리벡 곡선 그래프로 나타낸 것이다. 윤활형태를 살펴보면 Non-textured의 경우 Sommerfeld 수가 증가함에 따라서 마찰계수가 감소하는 전형적인 Mixed-film 윤활영역이며, Dimple 1~5의 경우 Mixed-film 윤활영역과 Sommerfeld 수가 증가함에 따라서 마찰계수가 증가하는 유동압 윤활영역 경계에 분포한다<sup>[7]</sup>. 유동압 윤활영역은 충분한 양압력이 하중능력을 증가시켜 미끄럼 표면 사이에서 분리력의 역할을 한다<sup>[15]</sup>. 이는 마이크로 디ンプル 텍스처링이 윤활형태를 더 좋게 바꾸었음을 의미한다.

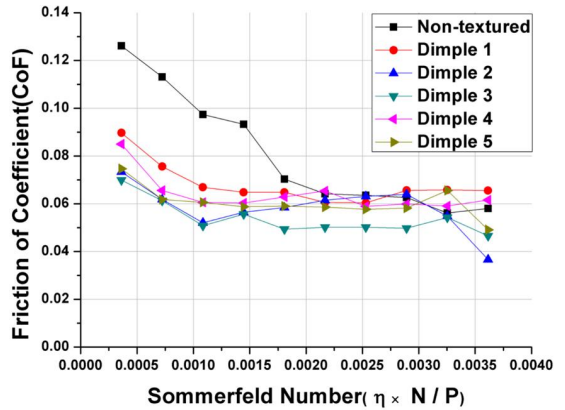


Fig. 6 Stribeck curve of surface texturing

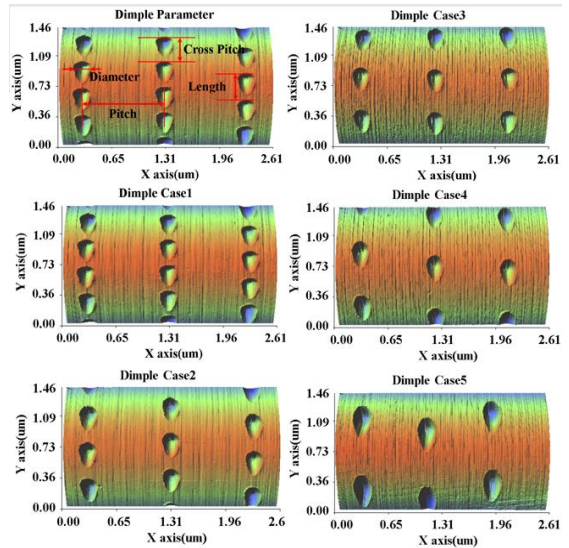


Fig. 7 Dimple surface patterns with different cases

### 3.2 디ンプル표면과 형상치수

Fig. 7은 비접촉식 형상측정기 (NV-2000, Nanosystem)을 사용하여 디ンプル 표면을 촬영한 결과이다. 촬영된 디ンプル 표면의 3차원 표면형상치수는 비접촉식 형상측정기와 연동되는 나노맵 소프트웨어를 이용하여 고정도로 측정 할 수 있다. 따라서, 나노맵 소프트웨어를 사용하여 디ンプル수인 횡방향 피치, 길이 방향 디ンプル크기, 종방향 피치, 폭방향 디ンプル크기를 각각 측정하였다. Fig. 8을 보면 디ンプル 개수가 증가할수록, 즉 CNC 선반 주축 회전수의 증가



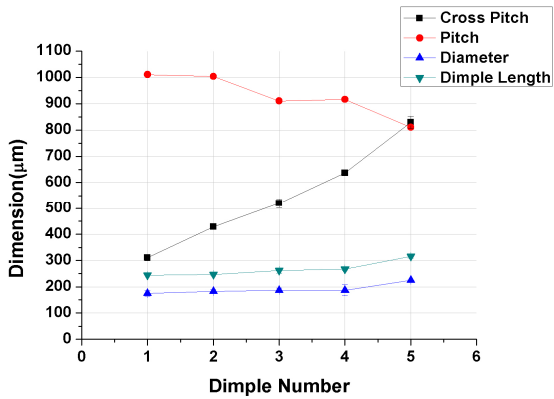


Fig. 8 Dimple surface parameters of all cases

에 따라 딤플간 종방향 피치, 길이 방향 딤플 크기, 폭 방향 딤플크기는 증가한다. 반면 딤플간 횡방향 피치는 감소하는 경향이 있다. 이 중 종방향 피치의 변화가 가장 크다. 이를 이용하여 마찰계수 결과와 WCA 결과를 설명하고자 한다.

### 3.3 마찰계수 실험결과

Fig. 9는 마찰 실험 결과 그래프이다. X축은 마찰 실험시의 Spindle 회전수를 의미하며, 오른쪽 상단의 범례는 Dimple의 경우를 나타낸다. 마찰시험기 만능재료시험기 Spindle 회전수의 변화에 따라 마찰계수가 측정되었다. Hertzian 응력 이론을 적용하면 시험하중 20 N의 접촉선 너비는 45 μm이며, Fig.

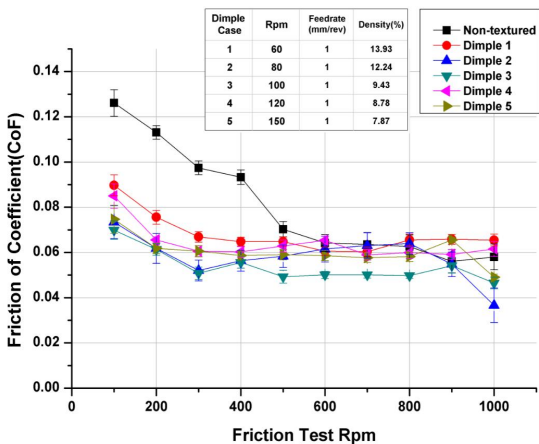


Fig. 9 Friction of coefficient test result graph

8의 딤플 길이 보다 접촉 선 너비가 작으므로 딤플 텍스처링은 마찰 감소에 영향을 줄 수 있다<sup>[2]</sup>. Non-textured 경우를 제외하면 Dimple 1이 가장 높은 영역 마찰계수를 가지는데, Dimple 1은 상대적으로 높은 딤플 밀도를 가졌다. 딤플 밀도의 증가는 실제 접촉 면적의 감소를 만들어 접촉면에서의 압력이 증가한다<sup>[2]</sup>. 따라서 마찰 계수가 높게 나왔다. 반면 Dimple 3, 5의 경우는 낮은 영역대의 마찰계수를 가졌으며, Dimple 3의 경우가 가장 낮은 영역의 마찰계수 결과가 나왔다. 이는 밀도가 9.43 %인 딤플 패턴이 가장 높은 동유압을 만들었음을 의미한다. Dimple 5의 경우 딤플간 동유압의 영향이 종방향 피치의 증가로 감소하게 되어 상대적으로 높은 마찰계수가 나왔다. Dimple 2, 4의 경우는 중간 영역대의 마찰계수 결과가 나왔다. 이러한 마찰계수 결과들은 Fig. 10에서 이송방향에서의 WCA 결과와 함께 설명할 수 있다.

### 3.4 물접촉각

Fig. 10은 이송방향 WCA를 밀도의 변화에 따라 Non-textured의 경우의 결과와 함께 나타낸 것이다. WCA는 밀도의 크기가 작아짐에 따라 커지는 경향을 볼 수 있다. 이는 다음과 같이 설명 할 수 있다. 일정한 횡방향 딤플 피치 아래에서 딤플 밀도가 감소하면 물 저수지 역할을 하는 딤플 면적이 감소된다. 따라서, 10 μl 용량의 WCA는 증가하는 경향이

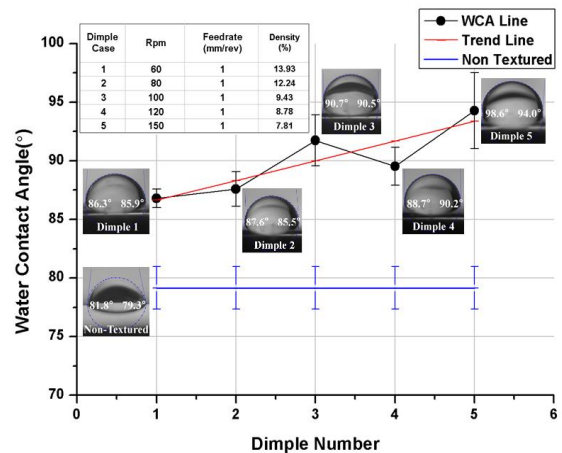


Fig. 10 Dimple surface feed direction WCA

나타나게 된다. CNC 회전수의 증가로 딥플 부근의 표면 거칠기와 돌기가 증가하게 되면 WCA값은 증가하며 마찰력은 감소한다<sup>[3]</sup>. Non-Textured WCA 평균값은 가장 낮은 영역대에 분포함을 볼 수 있다. 이것은 딥플 주변부 버나 돌기와 같은 접착력을 만드는 요소들이 줄어들게 되어 WCA가 낮게 나왔다. 반면, Fig. 9의 마찰계수 결과 그래프에서 Non-Textured의 경우가 가장 높은 영역대이다. 이와 같은 결과는 딥플 주변부의 벌지(bulges)가 있는 것이 폴리싱된 시편의 것 보다 마찰계수가 더 낮기 때문이다<sup>[16]</sup>. 즉, 벌지(bulges)가 맞닿는 두 표면의 접촉면적을 줄이는데 기여한다는 것이다. 따라서, Non-textured 표면보다 딥플이 제작된 표면이 마찰계수를 감소하게 만든다. Dimple 1의 경우 5가지 경우 중 가장 높은 마찰계수를 보였고 이송방향 WCA에서는 가장 낮은 WCA를 보였다. Dimple 3, 5의 경우는 마찰계수가 가장 낮은 영역대에 속하며, 이송방향 WCA의 경우 가장 높은 영역대에 속한다. WCA가 높을수록 표면장력이 높다는 의미이며, 이는 두 표면 사이를 더 많이 분리하게 만든다<sup>[2]</sup>. Dimple 2, 4의 경우는 마찰계수 그래프와 이송방향 WCA 그래프 모두에서 중간영역에 분포함을 확인하였다. 위 결과들을 통해, 이송방향 WCA와 마찰계수와의 관계는 상반된 경향을 가지고 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 11의 절삭방향 WCA는 이송방향 WCA와 반대 경향의 결과가 나왔다. 이러한 경향은 다음과

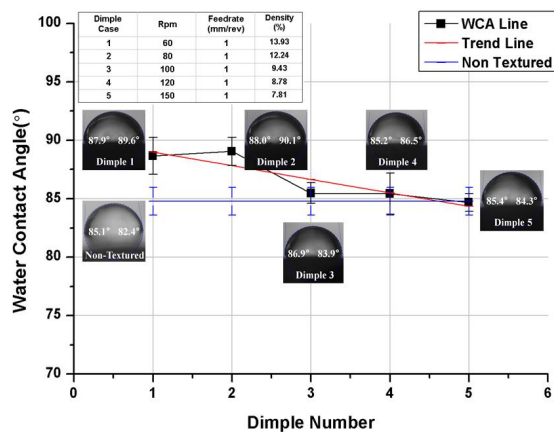


Fig. 11 Dimple surface cutting speed direction WCA

같이 설명 할 수 있다. CNC 선반 주축 회전수 증가로 딥플간 종방향 피치가 증가한다. 종방향 피치의 증가는 절삭속도 방향에서의 WCA가 매끄러운 표면의 영향을 더 받게 만든다. 또한 물방울 면적 내 포함되는 딥플이 감소하여 고체-액체(물 10  $\mu$ l)의 접촉 면적비율을 감소하게 만든다<sup>[17]</sup>. 따라서, 절삭방향에서의 WCA 크기는 CNC 선반의 주축회전수가 증가함에 따라 감소하게 되는 경향이 나타난다.

#### 4. 결론

이중 주파수 적용 타원형 진동 궤적법이 적용된 딥플 텍스처링 표면의 마찰계수와 습윤성 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Stribeck 곡선에서 Mixed-film 윤활영역이었던 Al6061-T6 소재의 Non-Textured 표면은 딥플 텍스처링을 통해 Mixed-film 윤활영역과 유동압 윤활영역 사이에 분포하도록 만들었다. 이는 더 우수한 표면윤활형태를 만들었음을 의미한다.
2. 마찰계수의 크기는 9.43 %의 밀도를 가지고 있는 Dimple 3의 경우가 가장 낮았으며, 마찰계수 결과는 이송방향 물접촉각 (WCA)과 상반된 경향이 나왔다. 또한, 절삭방향의 WCA는 이송방향 WCA와 반대의 경향이 나타남을 확인하였다. 절삭방향의 WCA는 딥플 종방향 피치의 영향을 크게 받는다.

#### 후 기

“이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(과제번호 NRF-2020R1A2B5B02001755).”

#### REFERENCES

1. Nakano, M., Korenaga, A., Korenaka, A., Miyake, K., Murakami, T., Ando, Y., Usami, H., Sasaki, S., “Applying Micro-Texture to Cast Iron Surfaces to Reduce the Friction Coefficient Under

- Lubricated Conditions,” *Tribology Letters*, Vol. 28, Issue 2, pp.131-137, 2007.
2. Song, Y., Premachandran Nair, R., Zou, M., Wang, Y. A., “Adhesion and friction properties of micro/nano-engineered superhydrophobic/hydrophobic surfaces,” *International Journal of Thin Solid Films*, Vol. 518, Issue. 14, pp. 3801-3807, 2010.
  3. Yoon, E. S., Yang, S. H., Kong, H. S., Kim, K. H., “The Effect of Topography on Water Wetting and Micro/Nano Tribological Characteristics of Polymeric Surfaces,” *Tribology Letters*, Vol. 15, No.2, pp.145-154, 2003.
  4. Bai, W., Sun, R., Gao, Y., Leopold, J., “Analysis and modeling of force in orthogonal elliptical vibration cutting,” *The International Journal of advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, Issue. 5-8, pp.1025-1036, 2016.
  5. Kurniawan, R., Kiswanto, G., Ko, T. J., “Micro-Dimple pattern process and orthogonal cutting force analysis of elliptical vibration texturing,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 106, pp.127-140, 2016.
  6. Kurniawan, R., Ko, T. J., “Surface topography analysis in three-dimensional elliptical vibration texturing(3D-EVT),” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 102, Issue 5-8, pp.1601-1621, 2019.
  7. Huang, Wei., Jiang, L., Zhou, C., Wang, X., “The lubricant retaining effect of micro-dimples on the sliding surface of PDMS,” *Tribology International*, Vol. 52, pp.87-93, 2012.
  8. Kubiak, K. J., Wilson, M. C. T., Mathia, T. G., Carval, P., “Wettability versus roughness of engineering surfaces,” *Wear*, Vol. 271, Issue 3-4, pp. 523-528, 2011.
  9. Lotfi, M., Sajjady, S. A., Amini, Saeid., “Wettability analysis of titanium alloy in 3D elliptical ultrasonic assisted turning,” *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 2, Issue 3, pp. 235-240, 2019.
  10. Saood, A., Park, G. C., Kurniawan, R., Ko, T. J., “Effect of machining Parameters on Micro-Dimple Characteristics in Dual-Frequency 3D Elliptical Resonant Vibration Surface Texturing,” *The Korean Society of Manufacturing Process Engineers 2019 KSMPE Autumn Conference*, pp. 118-118, 2019.
  11. Tang, W., Zhou, Y., Zhu, H., Yang, Haifeng., “The effect of surface texturing on reducing the friction and wear of steel under lubricated sliding contact,” *Journal of the Applied Surface Science*, Vol. 273, pp.199-204, 2013.
  12. Wakuda, M., Yamauchi, Y., Kanzaki, S., Yasuda, Y., “Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact,” *Wear*, Vol. 254, Issue 3-4, pp.356-363, 2003.
  13. Adelina, B., Gianni, C., Filippo, M., “Influence of surface wettability on friction and wear tests,” *Wear*, Vol. 222, Issue 1, pp.57-65, 1998.
  14. Gachot, C., Rosenkranz, A., Hsu, S. M. Costa, H. L., “A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement,” *Wear*, Vol. 372-373, pp.21-41, 2017.
  15. Ahmad, A., Masjuki, H. H., Varman, M., Kalam, M. A., Habibullah, M., Al Mahmud, K. A. H., “An overview of geometrical parameters of surface texturing for piston/cylinder assembly and mechanical seals,” *Meccanica*, Vol. 51, Issue 1, pp.9-23, 2016.
  16. Amanov, A., Tsuboi, R., Oe, H., & Sasaki, S., “The influence of bulges produced by laser surface texturing on the sliding friction and wear behavior,” *Tribology International*, Vol. 60, pp. 216-223, 2013.
  17. Lu, Y., Guo, P., Pei, P., Ehmann, K. F., “Experimental studied of wettability control on cylindrical surfaces by elliptical vibration texturing,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, Issue 9-12, pp. 1807-1817, 2015.