

액체금속(GaInSn)윤활하에서 DLC(ta-C) 코팅된 레이저 표면 텍스처링 딴플패턴의 미끄럼 마찰특성평가

권규빈¹ · 장영준² · 채영훈^{3*}

¹경북대학교 금속신소재공학과 학부생

²한국재료연구원 책임연구원

³경북대학교 공학설계연구소 연구교수

Evaluation of Sliding Friction Properties of Laser Surface Texturing Dimple Pattern with DLC Coating under GaInSn Liquid Metal Lubricant

Gyubin Kwon¹, Youngjun Jang² and Younghun Chae^{3*}

¹Undergraduate Student, Dept. of Materials Science and Metallurgical Eng., Kyungpook National University

²Principal Researcher, Extreme Environmental Coating Dept., Korea Institute of Materials Science (KIMS)

³Research Professor, Institute of Engineering and Design, Kyungpook National University

(Received May 24, 2021 ; Revised June 14, 2021 ; Accepted June 15, 2021)

Abstract – There are several studies on reducing the friction that occurs on the relative sliding contact surface of moving parts under extreme environments. In particular, a solid lubricated bearing is studied to solve the tribological problem with friction reduction and durability parts using solid lubricants (lead or silver) in a vacuum atmosphere. Galinstan is mainly used as a liquid metal lubricant, but it is inevitable to have limited tribological applications owing to its high coefficient of friction. Many researchers work on surface texturing for surface modification and precision processing methods. To increase durability and low friction, DLC coating with hydrophobicity is applied on the contact surface texture. Therefore, using an untextured specimen, a dimple specimen, and a DLC-coated dimple specimen under liquid metal lubrication, this paper presents the following experimental sliding friction characteristics in the sliding friction test. 1) The average coefficient of friction of the DLC-coated dimple specimen and dimple specimen are lower compared to that of a non-patterned specimen. 2) In the DLC-coated dimple specimens, the average coefficient of friction changes according to the change in the dimple density. 3) DLC-coated dimple specimens with a density of 12.5 have the lowest average coefficient of friction under 41.6 N of normal load and 143.3 RPM.



© Korean Tribology Society 2021. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

Keywords – dimple pattern(딴플 패턴), DLC(diamond like carbon), laser surface texturing(레이저 표면 텍스처링), liquid metal lubricant(액체 금속 윤활), sliding friction(미끄럼 마찰)

*Corresponding author: Young-Hun Chae

Tel: +82-53-950-6313, Fax.: +82-53-956-6388

E-mail: yhunchoe@knu.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0002-3192-325X>

<https://orcid.org/0000-0001-7355-1661> (Gyubin Kwon)

1. 서 론

극한환경 하의 구동되는 부품은 상대미끄럼접촉면에서 발생하는 마찰저감을 위하여 윤활유 및 표면거칠기를 인

위적으로 부여하고 이로 인한 부품의 내구 수명에 대한 많은 연구를 보고하고 있다[1,2].

특히 진공분위기하에서는 고체윤활제인 납(Pb) 또는 은(Ag)을 베어링 볼(ball) 또는 레이스에 코팅하여 마찰저감 및 내구수명에 대한 연구를 수행하여 보고하고 있다[3]. 그러나, 사용온도 350°C 이상에서 납과 은은 증발되어 소착되는 현상으로 고체윤활제의 역할을 할 수 없게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 고온에서 사용할 수 있는 금속윤활 베어링을 연구한 바 있다[4]. 그러나 고온 금속윤활 베어링에서 원활한 작동 및 특성을 보장하는 액체금속 윤활제인 Gallistan 합금 등이 주로 사용되고 있지만, 높은 마찰계수로 인해 제한적인 응용을 가질 수 밖에 없는 실정이다[5,6].

미케니컬 쉘과 같은 미끄럼 베어링에서 발생하는 접촉형상은 평평한 표면에서의 균일한 접촉압력이 매우 중요하다. 이것은 표면 텍스처링(Surface texturing)에서 동수압(Hydrodynamics pressure)과 공동(Cavitation) 현상으로 미끄럼 접촉에서 저마찰 윤활에 기여하고 있다[7].

표면 텍스처링에서 표면패턴과 정밀가공방법은 많은 연구자들에 의해 수행되었으며, 트라이볼로지적 응용을 위하여 다양한 표면 패턴을 적용하였다[8]. 표면텍스처 가공은 기계적, 화학적, 물리적 및 열적방법으로 수행하고 있으며[9], 특히 레이저 표면텍스처링은 레이저 제어 변수(Laser control parameter)로 패턴의 형상 및 형태학(Morphology)을 용이하게 가공할 수 있다.

표면 텍스처링은 금속윤활베어링의 높은 마찰 현상을 개선하고, 접촉표면의 트라이볼로지적 특성을 향상시킬 수 있다. 그러나, 부적절한 텍스처 파라메타(깊이, 폭, 밀도)는 더 높은 마찰계수가 유발되며 표면텍스처 효과를 더 이상 기대할 수 없게 된다[10].

다이아몬드상 카본막 (Diamond-like carbon, DLC)은 다이아몬드의 고경도 특성을 갖는 sp^3 결합과 흑연의 저마찰 특성을 갖는 sp^2 결합이 혼성 결합을 이루고 있어 고경도, 저마찰 특성을 동시에 만족하므로, 기계, 가공 및 부품 등 산업에 널리 활용된다. 그 중, 사면체 비정질 카본 (Tetrahedral amorphous carbon, ta-C)은 sp^3 분율이 40% 이상이며, 수소가 포함되지 않는 DLC 막을 총칭한다. ta-C 코팅막은 DLC 중에서 경도가 가장 높고(40~80 GPa) 내열성이 뛰어나며 (<550°C), 코팅 중 기계적 필터를 사용하여 거대입자 제거에 따른 매끈한 표면 코팅이 가능하여 자동차의 엔진부품, 비철 금속용 절삭공구, 베어링 등에 활용된다[11]. 특히, 윤활성과 내구성을 높이기 위하여 소수성을 가지는 DLC 코팅을 표면 텍스처의 접촉 표면에 수행할 경우 최대의 트라이볼로지 특성 개

선을 기대할 수 있다.

따라서 본 연구에서는, 딥플 패턴이 형성된 표면에 ta-C 코팅으로 내구 수명의 향상을 도모하고자 한다. 이는 윤활제로 사용되는 액체금속이 마찰 계면과 소수성을 갖게 함으로써, 윤활유지 효과를 지속시키는 기능을 가지고 있다. 즉, 계면 간의 마찰계수 감소뿐 아니라 ta-C 코팅의 특성인 낮은 표면조도와 내마모성을 통해 우수한 표면 특성을 가지게 된다[12].

그러므로 액체금속윤활하에서 무패턴, 표면텍스처 가공된 시편, DLC코팅된 표면텍스처 가공된 시편을 이용하여, 미끄럼 마찰시험에서 미끄럼마찰특성평가를 수행하고, 또한 DLC 코팅된 표면텍스처 가공된 시편에 대한 최적의 설계조건을 고찰하고자 한다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 시편 및 시험 방법

2-1-1. 시편 제작

본 실험에서는 오스테나이트계 스테인리스강(STS304)을 이용하여 $\varnothing 6 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 상부시편과 $\varnothing 60 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 하부시편으로 준비하였다. 시편 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 핀 온 디스크방식의 미끄럼 마찰시험을 위하여 상부시편 표면에 딥플 패턴 가공을 수행하였다[13].

Table 1과 같이 (쥘레전스의 20 W Fiber laser 장비를 이용하여, 미끄럼 접촉표면에 10%, 12.5%, 15% 및 20%의 딥플 밀도와 평균 $55 \mu\text{m}$ 의 깊이를 갖도록 $\varnothing 100 \mu\text{m}$ 의 딥플을 가공하였다. 준비된 시험편의 표기를 Table 2와 같이 명기하였다.

또한, DLC 코팅은 한국재료연구원(KIMS)에서 자장여과아크플라즈마(FCVA) 코팅 시스템을 이용하여 제작

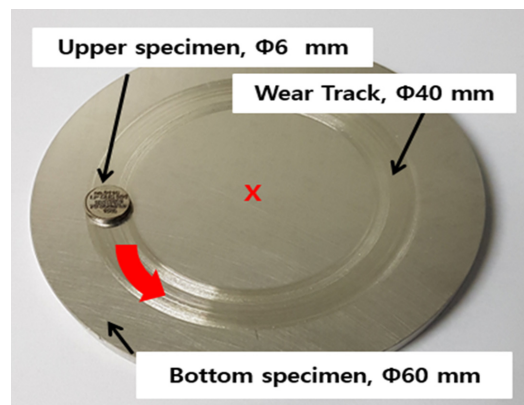


Fig. 1. Photo for specimens and wear track.

Table 1. Laser control parameter

Condition	Value
No of loop	1
Laser	Fiber laser
Speed	2 m/s
Power	40% of 20 W
Frequency	50 Hz
Pulse width	60 mm
Angle	45 degree
Edge offset	0.001 mm

Table 2. Notation for specimens

Specimens	Notation	
Untexture	UT	
10% dimple pattern	10T	
10% dimple pattern	10DT	
DLC coating	12.5% dimple pattern	12.5DT
15% dimple pattern	15DT	
20% dimple pattern	20DT	

하였다. 코팅 전 선형이온소스를 활용하여 모재 위 자연 산화막 제거를 실시하였으며, 모재와 ta-C 코팅층 간의 계면 접합성 증대를 위해 비평형 마그네트론 스퍼터링을 활용하여 Ti 중간층을 약 200 nm 두께로 코팅하였다. 이후 ta-C 코팅은 아크전류 (Arc current) 60 A, 기판 바이어스 -30 V로 코팅 막의 증착률을 고려하여 40분간 500 nm 두께가 되도록 하였다. Fig. 2는 코팅 장비와 코팅 중인 시료의 사진이다.

2-1-2. 시험 방법

본 실험에 준비된 액체금속 윤활제는 Fig. 3과 같이 순

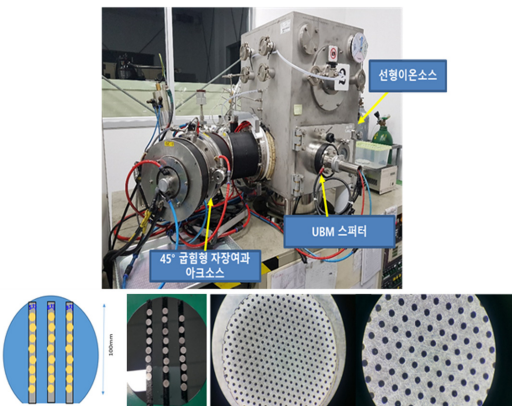


Fig. 2. Photos for coating machine and specimens.

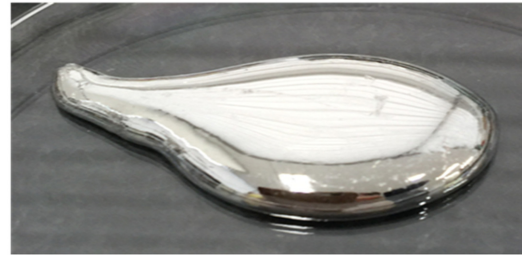


Fig. 3. Photo for liquid metal.

Table 3. Experiment conditions for friction

Type		Pin-on-disc
Specimen dimension	Upper [mm]	∅6 × 2
	Bottom [mm]	∅60 × 5
Normal load [N]		13.8, 27.7, 41.6
Sliding speed [RPM]		9.8, 28.7, 47.8, 66.9, 86, 105.1, 124.2, 143.3
Lubrication		99.99 % GaInSn

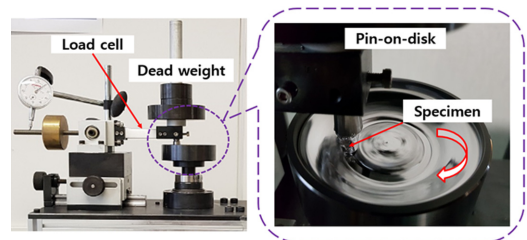


Fig. 4. Photos for Tribometer.

도 99.99%의 GaInSn을 사용하였으며, 68.5 wt.%의 갈륨(Ga)과 21.5 wt.%의 인듐(In) 그리고 10 wt.%의 주석(Sn)으로 구성되어 있다. GaInSn의 온도는 22~27°C를 유지하면서 마찰시험을 수행하였다. 딤플 패턴 시편과 DLC 코팅 딤플 패턴 시편 및 허부 시편을 준비하여 핀 온 디스크 방식의 마찰시험을 Table 3과 같이 수행하였다. Fig. 4와 같이 마찰 시험기를 이용하였으며, 허부 시편의 접촉 표면에 GaInSn 윤활 트랙이 형성되도록 수직 하중 9.8 N, 회전속도 150 RPM에서 런-인(Run-in)을 3 분간 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 액체금속윤활하의 무패턴, 딤플패턴 및 DLC 코팅 딤플패턴 마찰계수 변화

Fig. 5는 액체금속윤활하에서 13.8 N의 수직하중, 회전

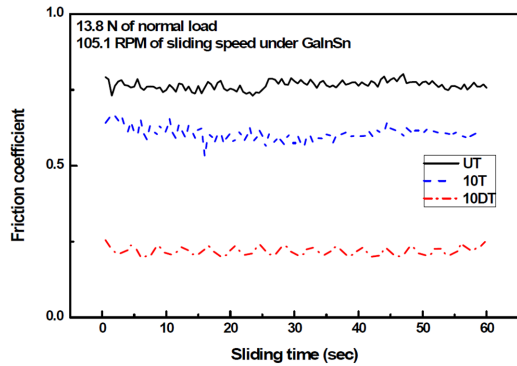


Fig. 5. Friction coefficient vs. sliding time for UT, 10T and 10DT specimens.

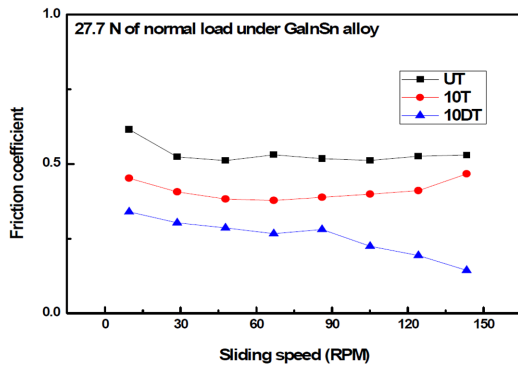


Fig. 6. Friction coefficient vs. sliding time for UT, 10T and 10DT specimens[5].

속도 105.1 RPM에서 UT, 10T 및 10DT의 미끄럼 마찰 시간 증가에 따른 마찰계수의 변화곡선을 보여주고 있다. UT는 평균 마찰계수 0.75, 10DT는 0.6의 평균마찰계수를 나타내었으며, 0.218의 가장 낮은 평균마찰계수를 10DT에서 확인할 수 있었다. Fig. 6은 액체금속윤활하에서 27.7 N의 수직하중에서 미끄럼 마찰속도 증가에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었다. 이것은 회전속도 증가에 따라 DLC 코팅의 영향으로서 경계윤활에서도 윤활저장효과(Lubricant reserve effect) 등으로 마찰계수 감소의 영향을 주고 있음[14,15]을 실험으로 확인하였다.

3-2. 액체금속윤활하의 딥플래트 밀도에 따른 마찰계수 변화

액체금속윤활하에서의 무패턴 시편 대비, 레이저 가공된 DLC 코팅 딥플 시편으로 미끄럼 마찰계수가 감소됨을 실험적으로 확인하였다. 또한, 기존 딥플 패턴에 DLC 코팅 시 50%의 평균 마찰계수 저감이 됨을 Fig. 5에서

설명하였다.

따라서 액체금속윤활하에서 미끄럼 베어링의 접촉표면에 DLC 코팅 딥플 시편은 마찰계수 저감효과를 가지는 것으로 본 마찰시험에서 확인하였다.

트라이볼로지 특성개선을 위하여 표면 텍스처링 기술은 형상크기, 밀도 및 깊이 등의 중심으로 연구보고되고 있으며[16,17], 이러한 연구는 최적의 표면텍스처 설계를 도출하고자 함이다. 또한, 텍스처의 밀도는 수직하중 지지 능력을 결정하는 중요한 요소이며, 동수압에 영향을 주어 마찰 저감효과를 가지게 된다[10].

딥플 밀도와 마찰 특성과의 상관관계를 실험적으로 평가하기 위해서 12.5%, 15% 및 20%의 딥플 밀도를 갖도록 제작한 시편으로 동일한 마찰시험을 수행하여 밀도에 따른 마찰계수변화를 실험적 확인이 필요하다.

3-3. 액체금속윤활하의 DLC 코팅 딥플패턴 밀도에 따른 마찰계수 변화

Fig. 7은 액체금속윤활하에서 41.6 N의 수직하중, 회전속도 105.1 RPM에서 10DT, 12.5DT, 15DT 및 20DT의 미끄럼 마찰시간 증가에 따른 마찰계수의 변화곡선을 보여주고 있다. 10DT는 평균 마찰계수 0.173, 12.5DT는 0.176의 평균마찰계수를 나타내었다. Fig. 8은 액체금속윤활하에서 41.6 N의 수직하중, 회전속도 124.2 RPM에서 10DT, 12.5DT, 15DT 및 20DT의 DLC 코팅 딥플 시편의 미끄럼 마찰시간 증가에 따른 마찰계수의 변화곡선을 보여주고 있다. 10DT는 평균 마찰계수 0.197, 12.5DT는 0.168의 평균마찰계수를 나타내었다. Fig. 9는 액체금속윤활하에서 41.6 N의 수직하중, 회전속도 143.3 RPM에서 10DT, 12.5DT, 15DT 및 20DT의 DLC 코팅 딥플시편의 미끄럼 마찰시간 증가에 따른 마찰계수의 변

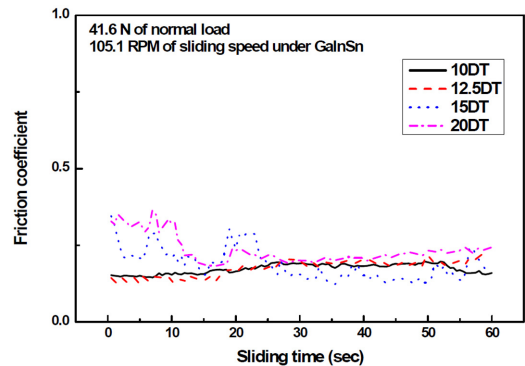


Fig. 7. Friction coefficient vs. sliding time for the density of pattern in DLC coating specimens.

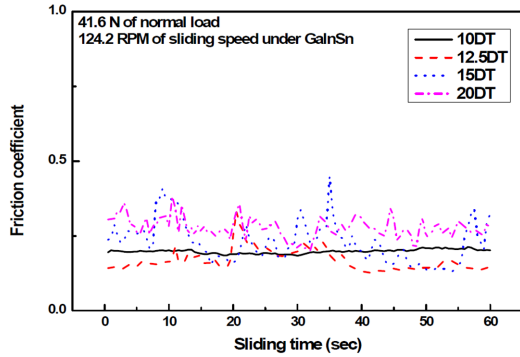


Fig. 8. Friction coefficient vs. sliding time for the density of pattern in DLC coating specimens.

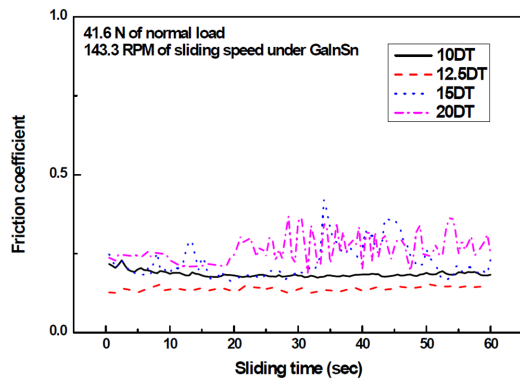


Fig. 9. Friction coefficient vs. sliding time for the density of pattern in DLC coating specimens.

회곡선을 보여주고 있다. 10DT는 평균 마찰계수 0.185, 12.5DT는 0.138의 평균 마찰계수를 나타내었다.

동일하중에서 회전속도가 증가시키면, DLC 코팅 디플시편은 12.5%의 밀도에서 마찰저감효과를 가지고 있음을 확인하였다. 이것은 Qiu 등[18]에 의하면 접촉하는 면에서 표면텍스처 디플은 수직하중 지지 능력을 향상시키고, 디플의 지름비율(Dimple-to-diameter ratio)과 회전속도에 따라 최적의 디플 밀도가 존재하고 있음을 확인하였다. 또한 윤활막 전단력 크기는 물리적 형상 접촉 표면(디플크기와 깊이)으로 윤활막을 바리시킬 만큼의 점성력 크기 이상 가진다면 마찰계수를 줄일 수 있음이 보고와 일치하였다[19].

3-4. 마찰시험전후의 미시적관찰

Fig. 10은 액체금속윤활하에서 마찰시험 후 마모된 상부 시편의 현미경과 SEM 사진이다. 디플 내에 액체금

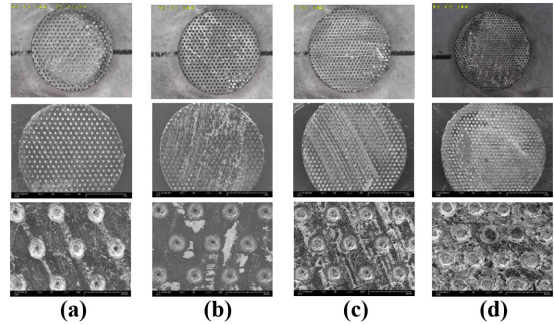


Fig. 10. Photography of worn surface after friction test. (a) 10DT (b) 12.5DT (c) 15DT (d) 20DT.

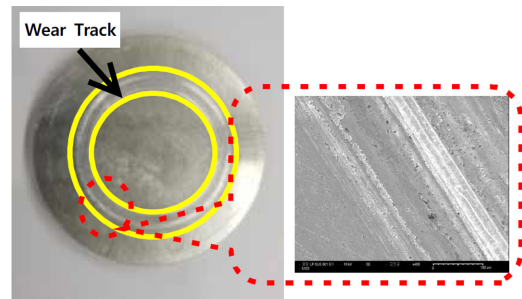


Fig. 11. Photography for worn surface on disk after friction test.

속윤활제가 존재하고 있다. 이것은 패턴이 윤활저장역할을 한 것으로 판단된다. Fig. 11은 실험 후의 하부디스크 마모 트랙 사진과 마모트랙 내의 표면 SEM 사진으로 액체금속이 접촉표면에서 이착된 표면이 확인되었다.

4. 결 론

액체금속윤활하에서 무패턴시편, 표면텍스처 가공된 시편, DLC 코팅된 표면텍스처 가공된 시편을 이용하여, 미끄럼 마찰시험에서 미끄럼마찰특성평가를 수행하고, 또한 DLC 코팅된 표면텍스처 가공된 시편에 대한 최적의 설계조건을 고찰하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 표면 텍스처된 디플시편과 DLC 코팅 디플시편이 무패턴시편보다 미끄럼 평균 마찰계수가 감소되었다.
- 2) DLC 코팅 디플시편에서 디플 밀도 변화에 따라 평균 마찰계수가 변화됨을 실험적으로 확인할 수 있었다.
- 3) 41.6N의 수직하중, 회전속도 143.3 RPM에서 밀도 12.5%의 DLC 코팅 디플 시편이 가장 낮은 평균마찰계수를 가지고 있었다.

Acknowledgements

이 논문은 2018학년도 경북대학교 국립대학교육성사업 지원비에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Chae, Y. H., "Friction Property for Micro-scale Surface Texturing under Galinstan Liquid Metal Bearing", Proc. Fall Conf. Korean Tribol. Soc., Pyeongchang, Korea, October 2018.
- [2] Jo, J. H., Kim, C. H., "Analysis of fluid flow characteristics around the rolling element in the ball bearings", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.28, No.6, pp.278-282, 2012, <https://doi.org/kstle.10.9725/kstle.2012.28.6.278>
- [3] Makoto N., Mineo S., "Solid-lubricated ball bearings for use in a vacuum - state-of-the-art", *Tribology International*, Vol.32, No.11, pp.637-647, 1999, [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00089-4](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00089-4)
- [4] Chae, Y. H., "Friction Property on Surface Texturing of GaInSn of Liquid Metal Bearing", Proc. Spring Conf. Korean Tribol. Soc., Pusan, Korea, April 2018.
- [5] Park, M. S., Jang, Y. J., Chae, Y. H., Jeong, S. D., "Evaluation of Sliding Friction Properties of Laser Surface Texturing Micro-Dimple Pattern with DLC Coating, under GaInSn Liquid Metal", Proc. Fall Conf. Korean Tribol. Soc., Pusan, Korea, October 2019.
- [6] Li, X., Li, Y., Tong, Z., Ma, Q., Ni, Y., Dong, G., "Enhanced lubrication effect of gallium-based liquid metal with laser textured surface," *Tribol. Int.*, Vol.129, pp.407-415, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.037>
- [7] Fowell, M., Olver, A. V., Gosman, A. D., Spikes, H. A., Pegg, I., "Two Mechanisms of Hydrodynamic Lubrication in Textured Bearings", *J. Tribol.*, Vol.129, No.2, pp.336-347, 2007, <https://doi.org/10.1115/1.2540089>
- [8] Abdel-Aal, H. A., "Functional Surfaces for Tribological Applications: Inspiration and Design", *Surf. Topogr. Metrol. Prop.*, Vol.4, No.4, pp.043001, 2016
- [9] Costa, H. L., Hutchings, I. M., "Some Innovative Surface Texturing Techniques for Tribological Purposes", Proc. Inst. Mech. Eng., Part J: J. Eng. Tribol., 2015, <https://doi.org/10.1177/1350650114539936>
- [10] Dobrica, M. B., Fillon, M., Pascovici, M. D., Cicone, T., "Optimizing surface texture for hydrodynamic lubricated contacts using a mass-conserving numerical approach", Proc. Inst. Mech. Eng., Part J: J. Eng. Tribol., 2010, <https://doi.org/10.1243/13506501JET673>
- [11] Kwak, S. Y., Jang, Y. J., Kim, J. K., "Optimization of tetrahedral amorphous carbon (ta-C) film deposited with filtered cathodic vacuum arc through Taguchi robust design", *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, Vol.54, No.2, pp.53-61, 2021, <https://doi.org/10.5695/JKISE.2021.54.2.53>
- [12] Jang, Y. J., Kang, Y. J., Kim, G. T., Kim, J. K., "Tribology Coating Study of Thick DLC (ta-C) Film", *J. Korea Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.32, No.4, pp.125-131, 2016, <https://doi.org/10.9725/kstle.2016.32.4.125>
- [13] Chae, Y. H., Choi, S. G., Yoo, E. J., Kim, I. H., "Evaluation of Friction Properties and Precious Laser Engraving for a Dimple Pattern in Micro-Scale Laser Surface Texturing", Proc. Fall Conf. Korean Soc. Tribol. Lubr. Engr., Gyeongju, Korea, October 2015.
- [14] Pettersson, U., Jacobson, S., "Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts", *Tribol. Int.*, Vol.36, No.11, pp.857-864, 2013, [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(03\)00104-X](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(03)00104-X)
- [15] Erdemir, A., "Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication", *Tribol. Int.*, Vol.38, No.3, pp.249-256, 2005.
- [16] Chae, Y. H., "Friction Property for Angles of Micro-crosshatch Grooved Surface Pattern under Lubricated Sliding Contact", *J. Korean Soc. Prec. Eng.*, Vol.24, No.1, pp.79-84, 2007.
- [17] Chae, Y. H., Jang, C. S., Choi, W. S., "Friction Characteristics of Hexagonal Array Micro-scale Dimple Pattern by Density", *J. Korea Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.24, No.6, pp.368-373, 2008, <https://doi.org/10.9725/kstle.2008.24.6.368>
- [18] Qiu, Y., Khonsari, M. M., "Performance Analysis of Full-Film Textured Surfaces With Consideration of Roughness Effects.", *J. Tribol.* Vol.133, No.2, pp.021704, 2011, <https://doi.org/10.1115/1.4003303>
- [19] Brunetière, N., Tournier, B., "Numerical analysis of a surface-textured mechanical seal operating in mixed lubrication regime", *Tribol. Int.*, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.01.003>