

경계윤활에서 기계 부품 소재의 트라이볼로지적 특성에 관한 연구

김명구¹ · 서국진² · 남자현³ · 김대은^{4*}

¹연세대학교 기계공학과 석사과정생

²연세대학교 기계공학과 박사과정생

³삼성전자 생활가전사업부 책임연구원

⁴연세대학교 기계공학과 정교수

Study on Tribological Characteristics of Machine Component in Boundary Lubrication

Myeong-Gu Kim¹, Kuk-Jin Seo², Jahyun Nam³ and Dae-Eun Kim^{4*}

¹M. S. Student, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

²Ph. D. Student, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

³Staff Engineer, Digital Appliances Business, Samsung Electronics Co., Ltd

⁴Professor, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

(Received October 1, 2019 ; Revised November 20, 2019 ; Accepted November 23, 2019)

Abstract – The friction and wear between machine components directly influence the energy loss and failure in various machines. Therefore, there is always a demand for finding methods to reduce friction and wear. Of the possible methods, lubrication is a widely used method for reducing friction and wear. In the case of lubrication, it is important to analyze the tribological behavior in the boundary lubrication because most of friction and wear occurs in the boundary lubrication regime. Cast iron has been regarded as a good material for industrial applications due to the excellent mechanical properties and high productivity. Especially, nodular cast iron is a material that shows better mechanical properties and wear-resistance compared with cast iron due to inclusion of spheroidal graphite. In this work, we investigated the tribological characteristics of nodular cast iron with respect to different counter parts in boundary lubrication regime. Sliding tests were conducted with SUJ2, ZrO₂, Si₃N₄ balls as counter parts using a pin-on-disk type tribotester. The results showed different friction and wear behaviors with different counter parts. The case of ZrO₂ showed the lowest wear rate in specimen and no significant ball wear. In case of SUJ2, it showed similar wear rate with ZrO₂ case in specimen and the highest friction coefficient. The case of Si₃N₄ showed the lowest friction coefficient, 33% lower than the case of SUJ2. It showed 16.9 times larger wear rate in specimen and 43% larger wear rate in ball compared to that of the SUJ2 case.



© Korean Tribology Society 2019. 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 – nodular cast iron(구상흑연주철), sliding friction(미끄럼 마찰), boundary lubrication(경계윤활), friction coefficient(마찰계수), Wear rate(마모율)

*Corresponding author: kimde@yonsei.ac.kr

Tel: +82-2-2123-2822, Fax: +82-2-365-0491

<https://orcid.org/0000-0002-6095-5138>

1. 서 론

기계의 작동에서 부품 간의 마찰과 마모는 기계 제품의 에너지 손실과 오작동 및 파손의 주요한 원인이 되며, 적절한 재료의 선택과 마찰 저감 기술을 통해 마찰 및 마모로 낭비되는 자원을 최소화하는 것이 중요하다 [1-3]. 주철은 열전도성과 가공성, 진동 흡수와 같은 기계적 특성이 뛰어난 소재이며, 구상흑연주철은 주철 내부에 마찰학적 특성이 뛰어난 구형의 흑연 입자들이 포함되어 내마모성과 기계적 특성이 더 향상된 소재이다 [4,5]. 이러한 특성으로 인해 구상흑연주철은 기계 내부 부품의 소재로 다양하게 활용되고 있으며, 기계 작동 시 나타나는 마찰 조건에서 구상흑연주철의 마찰 및 마모 저감을 위한 연구 역시 다방면으로 이루어지고 있다 [6-9].

마찰 및 마모의 저감을 위한 기술로는 코팅 [10], patterning과 texturing [11,12] 등의 방법이 다양하게 연구되고 있다. 그 중 윤활은 접촉면에서 발생하는 접촉을 줄이고 화학 반응을 방지하여, 마찰과 마모를 감소시키고 기계 제품의 내구성을 증가시킨다 [13-15]. 윤활의 단계는 크게 경계윤활, 혼합윤활, 유체윤활로 나누어지며, 경계윤활에서 마찰 및 마모가 가장 심각하게 나타나기 때문에 이 단계에서의 마찰학적 거동을 파악하는 것이 중요하다 [16,17]. 이러한 윤활제 중 하나인 Polyvinyl ether (PVE)는 기계 시스템에서 자주 사용되는 윤활제이지만, 혼합윤활 및 유체윤활 단계에 비해 경계윤활 단계에서의 연구는 매우 적게 보고되었다.

본 연구에서는 구상흑연주철 재질로 만든 기계 부품으로 제작한 시편에 대해 여러 재질의 상대면을 이용하여 마찰실험을 진행하고, 마찰학적 특성을 측정 및 분석하였다. 기계 제품에서 실제로 사용하는 윤활제인 Polyvinyl ether와 높은 접촉압력 조건을 통해 경계윤활 상태를 조성하여 마찰실험을 진행하였다. 회전 운동 조건을 모사하기 위해 Pin-on-disk 타입의 마찰실험기를 사용하였고, 시편에서 발생한 마모 특성을 3D laser confocal microscope를 통해 분석하여 트라이볼로지적 특성을 평가하였다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 시편 준비

본 연구에서는 상대면 재질에 따른 기계 부품 소재의 마찰학적 특성을 확인하고자 하였다. 시편은 구상흑연주철 계열의 GCD550으로 제작한 샤프트를 절단하여 원판 형태로 가공하였다. 마찰실험 전 시편의 표면 특성을 평가하기 위해 3D laser confocal microscope를 통해 표면

거칠기를 측정하였다.

2-2. 경도 측정

마모를 판단하기 위한 기본적인 물성인 경도 측정을 진행하였다. 시편의 경도는 비커스 경도계(Zwick Roell社)를 이용하여 측정하였다. 경도 측정은 1 kgf 수직하중을 10초간 압입하는 조건으로 진행하였다. 임의의 시편 3개에 대해 각각 3지점을 측정하였으며, 측정은 상온($\sim 24^{\circ}\text{C}$, $\sim 35\% \text{RH}$)에서 수행하였다.

2-3. 마찰실험

마찰실험은 Fig. 1(a)과 같은 pin-on-disk 방식으로 수행하였으며, Fig. 1(b)에 도시된 Pin-on-disk 방식의 마찰실험기(CSM Instrument社)를 사용하였다. 시편에 일정한 수직방향의 하중을 가하기 위해 dead weight 방식을 사용하여 10 N의 하중을 가하였고, 1.4~1.6 GPa 수준의 높은 접촉압력 환경을 조성하였다. R410A 냉동기유 중 하나인 Polyvinyl ether를 주사기로 시편에 미리 도포하여 경계윤활 환경을 조성한 후 실험을 진행하였으며, 자세한 실험 조건은 Table 1에 명시하였다.

마찰 상대면으로는 실제 산업에서 사용하는 금속 재질의 볼과, 볼이 마모되지 않는 마찰 환경을 조성하기 위해 금속 재질보다 경도가 높은 세라믹 재질의 볼을 사용

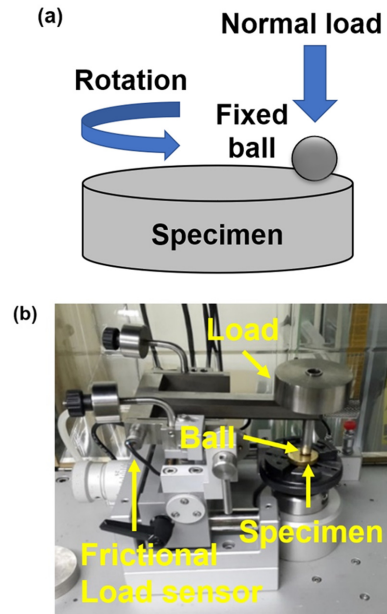


Fig. 1. (a) Schematic image of pin-on-disk type tribotest and (b) Pin-on-disk type tribotester.

Table 1. Tribotest conditions

Conditions	Value
Normal load (N)	10
Sliding speed (RPM)	200
Sliding radius (mm)	3
Sliding distance (m)	1000
Lubricant	PVE
Temperature (°C)	24
Humidity (%)	35
Repeating	3 times

Table 2. Contact pressure in test condition

Ball material	SUJ2	ZrO ₂	Si ₃ N ₄
Diameter (mm)	5.56	6.35	5.5
Contact pressure (GPa)	1.4	1.3	1.6

하였다. 금속 재질은 고경도 재질인 SUJ2베어링강을, 세라믹 재질은 ZrO₂ 및 Si₃N₄ 재질을 사용하였다. 볼은 초기 접촉압력이 비슷하게 형성될 수 있도록 규격품 내에서 크기를 선정하였으며, 각 마찰 상대면에 따른 접촉압력은 Table 2에 나타내었다. 모든 실험은 신뢰성을 고려하여 3번 반복하여 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 시편의 표면 특성 분석 결과

Fig. 2는 시편의 경도와 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 샤프트 절단 후 조도를 조절하는 과정에서 시편의 표

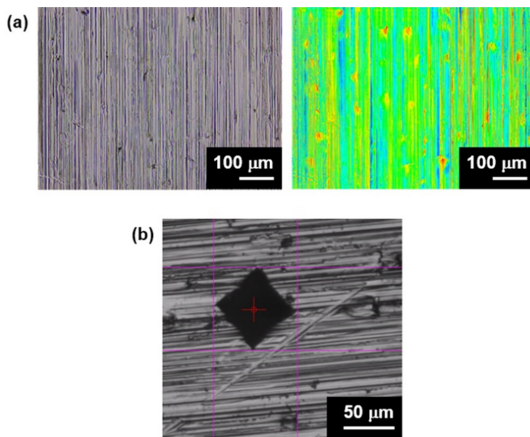


Fig. 2. (a) Surface image and 3D height profile and (b) image of Vickers hardness indentation mark.

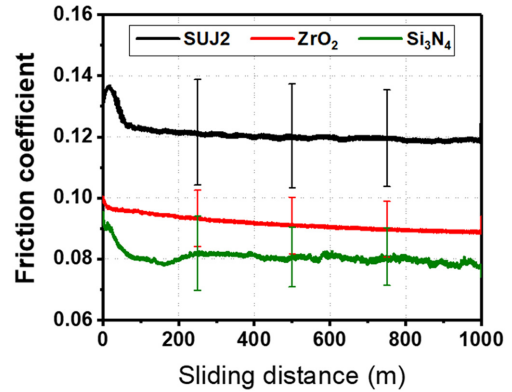


Fig. 3. Vickers hardness for specimen and ball.

면에 일정한 방향으로 가공 결이 형성되었으며, 표면 거칠기는 0.42 mm로 측정되었다. 시편의 경도는 277.7 HV으로 일반적인 구상흑연주철의 경도와 비슷하게 나타났다. Fig. 3는 시편의 경도와 마찰 상대면으로 사용한 볼 재질의 경도를 비교한 그래프이다. 각 볼의 경도는 SUJ2가 848 HV, ZrO₂가 1275 HV, Si₃N₄가 1631 HV이다.

3-2. 마찰계수 측정 결과

Fig. 4는 미끄럼 거리에 따른 마찰계수를 측정된 그래프이다. SUJ2는 마찰실험 초기에 마찰계수가 잠시 증가하다가 바로 감소하기 시작했고, 약 60 m 수준부터 안정화되었다. Si₃N₄는 마찰실험 초기부터 약간 감소하다가 약 100 m 이후부터 안정화된 모습을 보였다. ZrO₂는 실험 초기부터 안정적으로 나타났으며, 지속적으로 감소하는 모습을 보였다. 실험을 진행하는 동안 측정된 마찰계수의 평균값은 SUJ2가 0.121, ZrO₂는 0.092, Si₃N₄는 0.081로 나타났으며, Si₃N₄는 SUJ2보다 약 33% 낮은 값을 보였다.

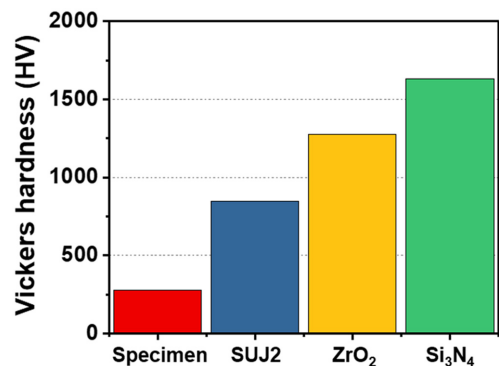


Fig. 4. Friction coefficient graph.

SUJ2에 비해 ZrO_2 의 마찰계수가 낮게 나타난 것은 초기 접촉압력이 낮으며 세라믹 재질로 인해 낮은 adhesive friction을 보이기 때문인 것으로 판단된다. 또한 Si_3N_4 의 초기 접촉압력이 가장 높음에도 마찰계수가 가장 낮은 것은 세라믹 재질이라는 점과 심각한 초기 마모로 인해 시편과 볼 모두 마모가 빠르게 진행되었고, 이로 인해 접촉 면적이 높아져 접촉압력이 빠르게 감소했기 때문인 것으로 판단된다.

3-3. 시편의 마모율 측정 결과

Fig. 5는 3D laser confocal microscope를 통해 측정 한 시편의 마모트랙 이미지와 단면 프로파일이다. SUJ2 볼과 ZrO_2 볼을 사용한 실험에 비해 Si_3N_4 볼을 사용한 시편에서 더 심각한 마모가 나타났으며, 마모 깊이 역시 각각 0.2 mm, 0.17 mm, 2.72 mm로 Si_3N_4 볼을 사용한 시편에서 가장 깊은 마모가 발생한 것을 확인하였다.

Fig. 6는 마모 면적을 통해 계산한 시편의 마모율 그래프이다. SUJ2 볼을 사용한 시편의 마모율은 $2.97 \times 10^{-11} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$, ZrO_2 볼을 사용한 시편의 마모율은 $1.93 \times 10^{-11} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ 로 나타났다. Si_3N_4 볼을 사용한 시편의 마모율은 $5.03 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ 로 나타났으며, SUJ2 볼을 사용한 시편에 비해 약 16.9배 높은 값을 보였다.

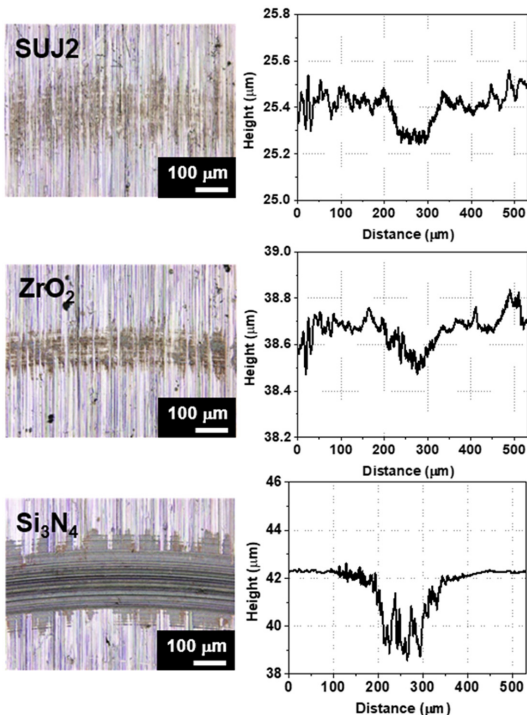


Fig. 5. Wear track image and surface profile.

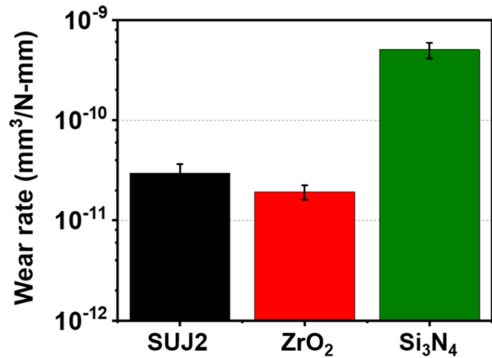


Fig. 6. Wear rate of specimen with respect to counter part.

Si_3N_4 볼을 사용한 시편에서 가장 심각한 마모가 발생한 것은 마모 입자의 영향으로 해석된다. 마찰을 통해 생성된 마모 입자는 일반적으로 변형을 경험했기 때문에 원재료보다 경한 특성을 가지며 [18], 이러한 마모 입자는 3-body abrasive wear를 일으켜 시편과 마찰 상대면에 추가적인 마모를 유발한다. Si_3N_4 볼을 사용한 실험에서는 마찰 상대면의 경도가 매우 높아 시편의 마모가 빠르게 발생하여 마모 입자가 SUJ2 볼을 사용한 경우보다 많이 형성되었고, 이로 인해 추가적인 마모가 지속적으로 발생했으므로 판단된다. 이는 다른 두 실험과 달리 Si_3N_4 볼을 사용한 실험의 마찰계수 그래프에서 안정화 단계에 들어선 이후에도 지속적으로 변동이 나타나는 것을 통해 확인할 수 있다.

3-4. 볼의 마모율 측정 결과

Fig. 7은 상대면으로 사용한 볼의 마모율 그래프이다. ZrO_2 볼은 스크래치 수준의 마모만 발생하여 마모율의 측정이 불가능하였다. 이는 ZrO_2 의 높은 경도와 낮은 마찰계수로 인해 볼 마모가 거의 발생하지 않은 것으로 판

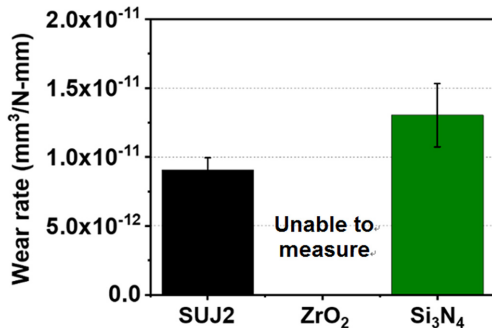


Fig. 7. Wear rate of ball with respect to counter part.

단된다. SUJ2 볼의 마모율은 $9.07 \times 10^{-12} \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$, Si_3N_4 볼의 마모율은 $1.30 \times 10^{-11} \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ 로 SUJ2볼에 비해 Si_3N_4 볼이 약 43% 높은 마모율을 보였다. 이는 SUJ2와 Si_3N_4 볼을 사용한 시편의 마모율 차이에 비해 현저히 작은 차이이며, 시편에서는 심각한 마모가 발생했지만 Si_3N_4 볼이 SUJ2 볼에 비해 경도가 높아 볼의 마모는 비교적 적은 차이를 보인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 마찰 상대면을 달리 하여 기계 부품 소재의 마찰 및 마모 특성을 평가하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 1000 m의 미끄럼 마찰 작용 동안 구상흑연주철 소재에 대해 SUJ2 베어링은 0.121, ZrO_2 는 0.092, Si_3N_4 는 0.081의 마찰계수를 보였다.

2. 시편의 마모율은 Si_3N_4 , ZrO_2 , SUJ2 순으로 크게 나타났다. Si_3N_4 볼을 사용한 실험에서 볼의 높은 경도와, 높은 초기 접촉압력으로 인해 시편의 초기 마모가 심하게 발생하였고, 마모 입자가 많이 형성되어 지속적으로 추가적인 마모가 발생했기 때문이다.

3. 상대면의 마모율은 Si_3N_4 가 SUJ2보다 크게 나타났으며, ZrO_2 는 마모가 거의 발생하지 않았다. ZrO_2 는 높은 경도와 낮은 마찰계수로 인해 마모가 발생하지 않았고, Si_3N_4 는 SUJ2에 비해 경도가 높고 마찰계수가 낮지만, 시편에서 심각한 마모가 발생하였고 이로 인해 볼의 마모 역시 SUJ2보다 크게 나타났다.

본 연구의 결과는 기계 부품 소재의 내구성 평가에 대한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

Acknowledgements

이 논문은 삼성전주식회사의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

[1] Kim, K. I., Kim, C. L., Kim, D. E., "Characterization of Durability of Coatings for Cell Phone Cover by Wear, Erosion, and Pull-off Tests", *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol.13, No.9, pp.1633-1639, 2012.
 [2] Holmberg, K., Erdemir, A., "Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs and Emissions", *Friction*, Vol.5, No.3, pp.263-284, 2017.
 [3] Han, D. L., Kim, T. H., Kim, D. E., "Study on the

Superlubricity and Running-in Period of Vitreous Enamel Coating using Phosphoric Acid", *Tribol. Lubr.*, Vol.34, No.6, pp.235-240, 2018, <https://doi.org/10.9725/kts.2018.34.6.235>.

- [4] Kang, E. G., Choi, H. Z., Min, B. K., Lee, S. J., "Plasma Diode Electron Beam Heat Treatment of Cast Iron: Effect of Direct Preheating", *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol.18, No.10, pp.1339-1345, 2017.
 [5] Vadiraj, A., Kamaraj, M., Sreenivasan, V. S., "Wear and Friction Behavior of Alloyed Gray Cast Iron with Solid Lubricants under Boundary Lubrication", *Tribol. Int.*, Vol.44, No.10, pp.1168-1173, 2011.
 [6] Aal, A. A., Ibrahim, K. M., Hamid, A., "Enhancement of Wear Resistance of Ductile Cast Iron by Ni-SiC Composite Coating" *Wear*, Vol.260, No.9-10, pp.1070-1075, 2006.
 [7] Straffelini, G., Giuliani, C., Pellizzari, M., Veneri, E., Bronzato, M., "Dry Rolling-sliding Wear of Austempered Cast Iron", *Wear*, Vol.271, No.9-10, pp.1602-1608, 2011.
 [8] Giacomelli, R. O., Salvaro, D. B., Bendo, T., Binder, C., Klein, A. N., Mello, J. D. B., "Topography Evolution and Friction Coefficient of Gray and Nodular Cast Irons with Duplex Plasma Nitrided + DLC Coating", *Surf. Coat. Technol.*, Vol.314, pp.18-27, 2017.
 [9] Nam, J. H., Do, H. C., Kang, J. Y., "Effect of Groove Surface on Friction Noise and Its Mechanism", *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol.18, No.8, pp.1165-1172, 2017.
 [10] Nunez, E. E., Yeo, S. M., Polychronopoulou, K., Polycarpou, A. A., "Tribological Study of High Bearing Blended Polymer-based Coatings for Air-conditioning and Refrigeration Compressors", *Surf. Coat. Technol.*, Vol.205, No.8-9, pp.2994-3005, 2011.
 [11] Nakano, M., Korenaga, A., Korenaga, 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", *Tribol. Lett.*, Vol.28, No.2, pp.131-137, 2007.
 [12] Lee, H. H., Lee, S. C., Park, J. K., Yang, M. Y., "Friction and Wear Characteristics of Surface-Modified Titanium Alloy for Metal-on-Metal Hip Joint Bearing", *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol.19, No.6, pp.917-924, 2018.
 [13] Hong, S. J., Lee, K. H., Lim, H. W., Kim, J. W., Lee, C. H., "The Friction and Wear Characteristics of the Seat Recliner Parts Based on Lubricant Characteristics", *Tribol. Lubr.*, Vol.35, No.3, pp.183-189, 2019, <https://doi.org/10.9725/kts.2019.35.3.183>.
 [14] Lim, T. Y., Kim, Y. H., Na, B. K., "Wear, Oxidation and Shear Characteristics of Mixed Lubricating

- Oil(Mineral/Vegetable oil) with ZnDTP”, *Tribol. Lubr.*, Vol.34, No.4, pp.160-167, 2018, <https://doi.org/10.9725/kts.2018.34.4.160>.
- [15] Li, Y. M., Yue, Q. B., Li, H. Y., He, H. B., “Friction and Wear Characteristics of 20Cr Steel Substrate and TiAlN Coating under Different Lubrication Conditions”, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol.19, No.10, pp.1521-1528, 2018.
- [16] Jeon, H. G., Lee, Y. Z., “The Evaluation of Wear Life Based on Accelerated Test through Analysis of Correlation between Wear Rate and Lubricant Film Parameter”, *Tribol. Trans.*, Vol.56, No.2, pp.290-300, 2013.
- [17] Liu, L., Yang, C., Sheng, Y., “Wear Model Based on Real-time Surface Roughness and Its Effect on Lubrication Regimes”, *Tribol. Int.*, Vol.126, pp.16-20, 2018.
- [18] Eyre, T. S., “Wear Characteristics of Metals”, *Tribol. Int.*, Vol.9, No.5, pp.203-212, 1976.