

3D 프린팅된 표면의 슬라이딩 방향에 따른 트라이볼로지적 특성 연구

심재웅¹ · 크리스찬 니콜라스 디 카로² · 서국진³ · 김대은^{4*}

¹연세대학교 기계공학과 석사과정생

²캘리포니아대학교 로스앤젤레스 물리천문학과 학부생

³연세대학교 기계공학과 박사과정생

⁴연세대학교 기계공학과 정교수

A Study on Tribological Properties of 3D-Printed Surface with Respect to Sliding Orientation

Jae Woong Sim¹, Christian Nicholas De Caro², Kuk-Jin Seo³ and Dae-Eun Kim^{4*}

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

²Undergraduate Student, Department of Physics & Astronomy, University of California, Los Angeles

³Ph. D. Student, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

⁴Professor, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

(Received October 2, 2019 ; Revised November 25, 2019 ; Accepted November 26, 2019)

Abstract – This paper presents an experimental investigation of friction and wear characteristic with respect to patterns occurring on the surface of 3D printed polymer products by fused deposition modeling method. The purpose of this study was to investigate the effect of the patterns and sliding directions on the tribological properties of 3D printed polymer surface. A cubic specimen was printed using polylactic acid filament as the printing material. Friction tests were conducted for different directions with respect to the patterns that were generated on the top and the side surfaces of the specimen, by using a ball-on-reciprocating type tribotester. SUJ2 bearing ball of which the diameter was 11 times greater than the width of the largest pattern was used as the counter surface to assess the frictional behavior. Friction tests were conducted on the top and the side surfaces with respect to the patterns in 3 (0°, 45°, 90°) different directions respectively. Coefficient of friction increased as cycles increased in all cases. The results of the tests showed that the lowest coefficient of friction was measured with the 45° sliding direction on the side surface. The wear rate was the lowest at 45° sliding direction on the side surface, while it was the highest at 0° sliding direction on the top surface. Coefficient of friction of about 0.45 was determined to be the converging value on the top compared to the side surface.



© 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 – 3D printing(3D 인쇄), fused deposition modeling(융합적층모델링), pattern(패턴), polymer(폴리머), tribology(트라이볼로지)

1. 서 론

3D 프린팅 방식 중 FDM (Fused Deposition Modeling) 은 재료를 적층하여 제품을 제작하는 방식으로 프린터 구조와 프린팅 알고리즘이 간단하다는 장점이 있다[1]. 또

*Corresponding author: kimde@yonsei.ac.kr
Tel: +82-2-2123-2822, Fax: +82-2-312-2159
<http://orcid.org/0000-0002-6095-5138>

한 FDM 프린팅 방식은 기존의 가공 방법에 비해 복잡한 형상을 쉽게 제조할 수 있으며 재료의 낭비를 최소화할 수 있다[2]. 이 방식은 폴리머와 금속 소재를 모두 활용할 수 있으며 프린팅 조건을 제어하여 제품의 기계적 특성을 조절할 수 있다는 장점이 있다[3]. 이 같은 장점으로 FDM 방식은 의료 공학, 자동차, 항공 우주 분야에서의 사용이 확대되고 있는 추세이다[4]. FDM 3D 프린팅은 노즐을 통해 재료를 쌓아 올리는 제작 방식으로 인하여 제품의 표면에 패턴이 필연적으로 발생한다[5]. 일반적으로 표면 패턴은 마찰 과정에서 발생하는 마모 입자를 포집하여 트라이볼로지적 특성을 개선시키는 역할을 할 수 있다고 보고되어 있다[5,6]. 또한, 패턴은 접촉면에 존재하는 유체에 압력 구배를 형성하여 윤활 효과를 높일 수 있다고 보고되어 있다[7]. 하지만 FDM 방식으로 출력한 제품 표면의 마찰 및 마모 특성에 대해 보고된 연구 결과는 부족한 실정이다. 따라서 FDM 방식으로 3D 프린팅된 제품 표면에 발생하는 패턴에 대한 트라이볼로지적 특성을 파악할 필요가 있다.

FDM 방식의 3D 프린팅 재료 중 polylactic acid (PLA)는 농작물에서 추출된 바이오 폴리머로 생 분해가 가능한 친환경 소재이나, 취성이 높고 수분에 대해 민감한 재료로 알려져 있다[8]. 이러한 단점들을 보완하고자 PLA에 섬유를 첨가하여 기계적 특성을 강화하고 트라이볼로지적 특성을 조사한 연구들이 보고되어 있다[8,9]. 썬기풀, 사이잘 등의 식물성 섬유가 첨가된 PLA 복합체에 대한 트라이볼로지적 효과를 조사한 연구가 보고되어 있으나, 해당 연구에서는 3D 프린터 출력물이 아닌 몰드를 이용하여 제작한 시편에 대해 실험을 진행하여 표면 패턴에 의한 효과는 보고하지 않았다[8]. 관련된 다른 연구에서는 PLA와 PLA-graphene 필라멘트를 이용하여 FDM 방식으로 3D 프린팅한 시편의 트라이볼로지적 특성을 비교한 바 있다. 해당 연구에서는 pin-on-disc 방식의 마찰 실험을 진행하였으나, 미끄럼 방향에 대한 패턴 효과를 조사하지 않았다[10].

본 연구에서는 FDM 방식의 3D 프린터로 제작한 PLA 시편의 표면에 발생하는 패턴에 대한 트라이볼로지적 특성을 조사하였다. 미끄럼 방향에 따른 패턴의 마찰 및 마모 특성을 조사하기 위해 미끄럼 방향을 패턴과 0°, 45°, 90°의 방향으로 설정하여 각각 마찰 실험을 진행하였다.

2. 실험

2.1. 시편 준비

본 연구는 FDM 방식으로 제작된 시편에 필연적으로

발생되는 표면 패턴에 대한 마찰 실험을 진행한다. 이를 위해, Fig. 1 같이 정육면체 형태의 시편(20×20×20 mm³)을 3D 프린터(신도리코社, DP201)를 이용하여 제작하였다. 열가소성 폴리머 중 하나인 PLA 필라멘트(직경 1.75 mm)를 사용하여 시편을 제작하였다. PLA의 기본 물성은 다음과 같다. 밀도는 1.24 g/cm³, 탄성 계수는 3500 MPa이며[10] 전이 온도는 63 °C, 녹는점은 180 °C이며[7] Vickers 경도는 약 14 HV로 측정되었다. 시편 표면에 존재하는 패턴의 크기와 형상이 일정할 수 있도록 프린팅 속도와 노즐 이동 속도를 모두 20 mm/s로 유지하였다. 프린팅 속도는 노즐에서 필라멘트가 나오며 모델을 제작할 때 노즐의 이동 속도이고, 이동 속도는 노즐에서 필라멘트가 나오지 않을 때 노즐이 이동하는 속도이다. 이 두 가지 속도의 적절한 조합이 좋은 품질의 제품을 제작하는데 중요한 요소이다. 자세한 프린팅 조건은 Table 1에 정리하였다.

3D 프린팅된 시편의 표면 패턴은 필라멘트 적층 방향에 따라 다르다. Fig. 2 (a)는 시편 윗면의 형상으로 3D 프린터 노즐의 이동 경로가 표면에 패턴을 생성하였다.

패턴 하나의 높이와 너비, 패턴 간격은 각각 약 57, 700, 80 μm이다. Fig. 2 (c)는 옆면의 형상으로 결 형태의 패턴이다. 결의 높이와 너비는 각각 약 28, 26 μm이며 형

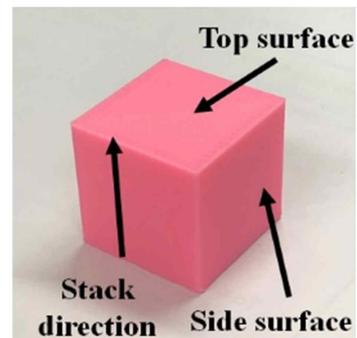


Fig. 1. Specimen (20×20×20 mm³) made with PLA by the 3D printing machine. Layers were piled up from the bottom in sequence.

Table 1. 3D-printing condition of FDM

Printing Condition	Value
Layer thickness	0.05 mm
Printing speed	20 mm/s
Movement speed	20 mm/s
Nozzle temperature	200 °C
Filling density	100%

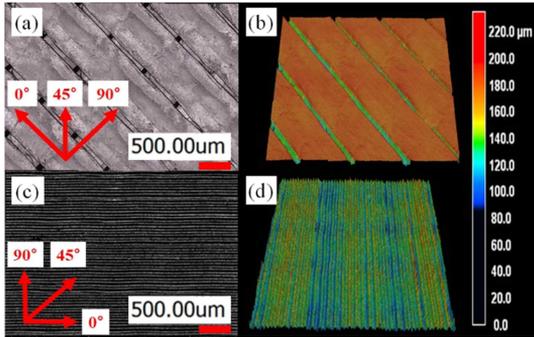


Fig. 2. Laser images of (a) pattern on the top surface and (c) pattern on the side surface of the specimen taken by 3D laser confocal microscope. Red arrows show sliding directions of the friction test. (b), (d) is the same images indicating the height of the images (a) and (c), respectively.

상이 윗면에 비해 매우 불규칙한 편이다. 옆면에서는 Fig. 2 (d)와 같이 waviness가 윗면에 비해 높게 생성되는 것을 확인하였다.

2.2. 실험 방법

마찰 실험은 Fig. 3의 ball-on-reciprocating 방식의 마찰 시험기를 사용하였으며 자세한 프린팅 조건은 Table 2에 나열하였다. 윗면과 옆면에 발생하는 표면 패턴의 형상과 미끄럼 방향에 따른 마찰 및 마모 특성을 조사하기 위하여 마찰 실험은 Fig. 2와 같이 패턴에 대하여 0°, 45°, 90°의 세가지 미끄럼 방향으로 진행하였다. 하중은 dead weight 방식으로 5 N을 가했으며, 미끄럼 속도는 6 mm/s, 미끄럼 거리는 3 mm로 5000 cycle 동안 마찰 실험을 진행하였다. 마찰 실험의 상대 면으로 시편의 패턴 크기보다 상대적으로 큰 직경 8 mm SUJ2 베어링 볼을 사용하였다.

제작된 시편은 에탄올, DI water 순으로 각각 10분간 초음파 세척하였으며, N₂ 가스를 이용하여 건조하였다. 모든 실험은 데이터의 신뢰성을 위해 각각 3번씩 반복하였다.

Table 2. Friction test conditions

Tip	8 mm diameter SUJ2 ball
Normal load	5 N
Sliding speed	6 mm/s
Sliding stroke	3 mm
Cycle	5,000
Temperature	22~25°C
Humidity	25~30%RH

2.3. 마모 면적 계산

3D 레이저 공초점 현미경(Keyence社)을 사용하여 시편의 마모 면적을 측정하였고 실험 후 마모 정도를 정량적으로 측정하기 위해 Archard방정식을 이용하여 마모율(Wear rate)을 계산하였다[12,13].

$$Wear\ rate = \frac{V}{L \cdot D} [mm^3 / N \cdot mm]$$

여기서 V, L, D는 각각 마모 부피, 수직 하중, 미끄럼 거리이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 마찰 계수 측정 결과

윗면과 옆면 패턴에 대하여 0°, 45°, 90°의 세가지 미끄럼 방향으로 마찰 실험을 진행한 결과 마찰 계수는 Fig. 4, Fig. 5와 같이 윗면과 옆면에서 공통적으로 cycle이 증가함에 따라 마찰 계수가 증가하였다.

윗면 패턴에 대한 마찰 계수는 Fig. 4와 같다. 0° 방향에서 마찰 계수가 실험 시작과 동시에 급격하게 상승하였으며 약 1500 cycle 이후로 마찰 계수의 증가가 적고 안정적이었다. 45° 방향에서는 전 구간에서 0°와 90° 방향 실험보다 마찰 계수가 천천히 증가하며 항상 낮았다. 90° 방향에서는 마찰 계수가 약 1900 cycle부터 가장 높았다.

옆면 패턴에 대한 마찰 실험 결과는 Fig. 5와 같다. 전 구간에서 마찰 계수는 45° 방향에서 가장 작게 증가하며 0°, 90° 방향보다 항상 낮게 나타났다. 0°, 90° 방향의 마찰 계수는 약 500 cycle까지는 유사한 수준을 보였으나

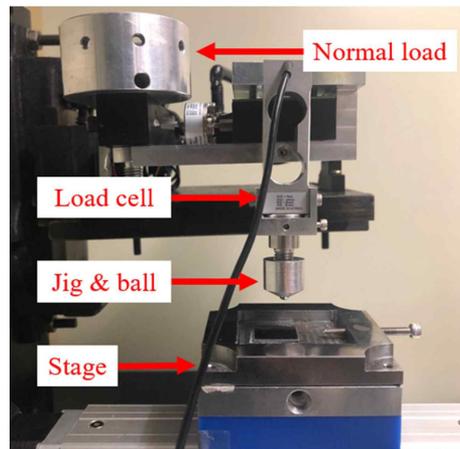


Fig. 3. Ball-on-reciprocating type tribotester.

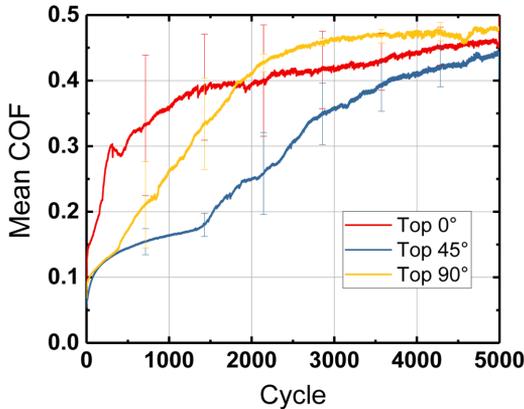


Fig. 4. Coefficient of friction with respect to the 3 sliding directions on the top surface.

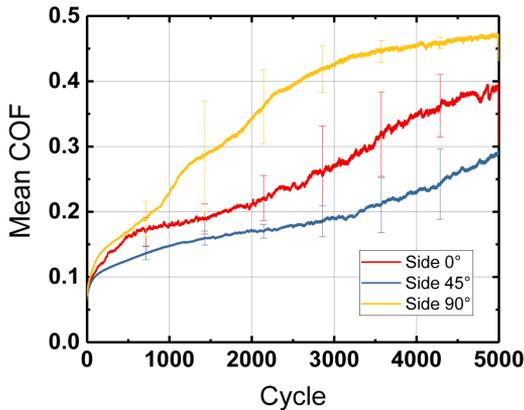


Fig. 5. Coefficient of friction with respect to the 3 sliding directions on the side surface.

이후에는 90° 방향의 마찰 계수가 빠르게 증가하면서 가장 높게 나타났으며 결과적으로 마찰계수는 0.46 수준의 윗면과 유사한 값으로 수렴하였다. 실험 종료 후, 마찰 계수는 0°, 45°, 90° 방향에서 각각 약 0.38, 0.46, 0.3으로 나타나며 45° 방향에서 가장 낮았다.

3.2. 마모 측정 결과

Fig. 6은 마찰 실험 후, 윗면과 옆면의 미끄럼 방향에 대한 마모율을 나타낸다. 마모율은 윗면 0° 방향에서 약 $2 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ 로 가장 크게 나타났으며 45°, 90°, 0° 순으로 45° 방향에서 가장 낮게 나타났다.

옆면에서의 마모율은 90° 방향에서 약 $1.25 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ 로 가장 크게 나타났으며 45°, 0°, 90° 순으로 45° 방향에서 약 $1.8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ 로 가장 낮게 나타나며 윗

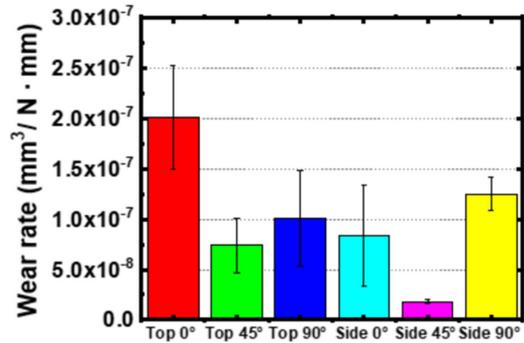


Fig. 6. Wear rate of friction tests on the top and side surfaces with respect to different sliding directions.

면과는 다른 경향성이 나타났다.

Fig. 7 (a)와 같이 윗면 0° 실험에서는 패턴의 크기보다 접촉 면적이 작아 SUJ2볼이 오직 한 패턴 위에서만 미끄럼 운동을 하여 패턴의 효과를 얻을 수 없었다. 따라서 높은 마모율이 나타났다고 볼 수 있다. 반면에 Fig. 7 (b), Fig. 7 (c)와 같이 윗면 45°, 90° 방향 실험에서는 볼이 4~5개의 패턴 위에서 이동하였고 패턴이 소성 변형되어 좌우로 밀려나는 현상이 관찰되지 않았다. 45°, 90° 실험에서는 마모 입자를 포집하는 패턴 효과를 얻었다고 볼 수 있다. 따라서 45°, 90° 실험은 0° 방향보다 낮은 마모율이 나타났다.

옆면 실험에서는 마찰 운동이 표면의 패턴과 waviness 영향을 받는다. 옆면 0° 방향 실험에서는 마찰 운동이 waviness의 골(Valley)에서 진행되었고 90° 방향 실험에서는 마찰 운동이 waviness 형상을 따라 진행되었다.

옆면의 경우 윗면에 비해 패턴이 조밀하게 밀집되어 있다. 따라서 옆면 패턴은 마찰이 진행됨에 따라 발생하는 마모 입자를 충분히 포집할 수 있으며 결과적으로 90° 방향을 제외하고 윗면 실험보다 낮은 마모율을 나타냈다.

90° 방향에서는 waviness의 영향을 가장 많이 받았다. Waviness의 마루(Peak)는 골(Valley)보다 상대적으로 높기 때문에 마모가 많이 발생하고 골에서는 마모가 마루보다 적게 발생하였다. 따라서 마모 트랙의 너비 변화가 나타났으며 마루에서의 마모 부피가 높게 측정되어 결과적으로 윗면 90° 방향보다 마모율이 높게 나타났다. Fig. 7 (e), Fig. 7 (f)과 같이 마모 트랙의 너비가 넓은 부분이 마루이고 좁은 부분이 골을 나타낸다. 마모 부피를 정확히 계산하기 위해서 전체 트랙에 존재하는 넓은 너비의 마모 트랙(Fig. 7 (e), (f)의 파란색 선) 부분과 좁은 너비의 마모 트랙(Fig. 7 (e), (f)의 흰색 선) 부분의 마모 면적을 개별적으로 측정하여 마모 부피를 도출하였다.

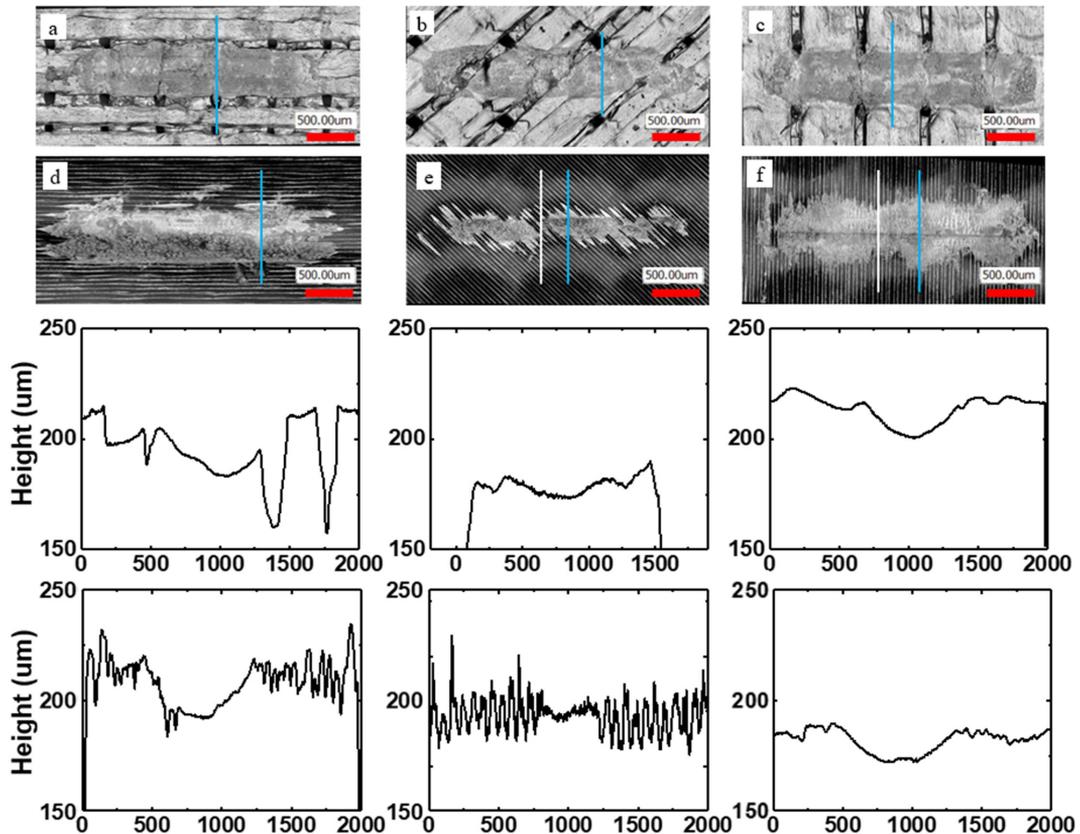


Fig. 7. Wear track images and the profiles of (a) the top surface with 0°, (b) 45°, (c) 90°; (d) the side surface with 0°, (e) 45 and 90°. Each blue line on the wear tracks images shows the profiles respectively. Blue and white line in (e), (f) indicates wide and narrow part of wear width in each wear track, respectively.

4. 결 론

본 연구에서는 PLA를 사용하여 FDM 방식의 3D 프린팅을 하였을 때 발생하는 패턴의 트라이볼로지적 특성에 대해 조사하였다. 윗면과 옆면의 패턴에 대해 다양한 미끄럼 방향으로 마찰 실험을 진행하였다.

마찰 계수는 사이클이 증가함에 따라 윗면과 옆면 모두 증가하였다. 윗면에서의 마찰 계수는 45° 방향에서 항상 가장 낮은 값을 나타냈지만 결과적으로 모든 방향에서 유사한 마찰 계수에 도달하였다.

옆면에서는 전 구간에서 마찰 계수가 45° 방향에서 가장 낮은 값으로 90° 방향보다 약 38% 낮은 0.3로 측정되었다. 윗면과 옆면 모두 45° 방향 실험에서 가장 낮은 마모율이 측정되었다.

마모율 측정 결과, 윗면 0° 방향의 마모율은 다른 실험들에 비해 최대 40% 높았다. 윗면 0° 방향에서는 오

직 1개의 패턴 위에서 마모 트랙이 발생하여 패턴의 효과를 얻지 못했으며 마모가 진행됨에 따라 패턴이 소성 변형되어 높은 마모율이 측정되었다. 옆면의 경우, 패턴이 조밀하여 마모 입자를 효과적으로 포집한 것으로 판단된다. 따라서 0°, 45° 방향에서 옆면의 마모율이 윗면보다 낮았다. 이는 옆면에 존재하는 waviness의 마루 부분에서 마모가 상대적으로 많이 발생한 결과로 볼 수 있다.

본 연구는 인쇄물 표면의 마찰 및 마모 특성이 우수한 FDM 방식 3D 프린팅 조건 연구에 기초 자료로 활용될 것으로 기대한다.

Acknowledgements

이 논문은 University of Sydney - Yonsei University - Joint International Program Development Fund의 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] Weng, Z., Wang, J., Senthil, T., Wu, L., “Mechanical and Thermal Properties of ABS/Montmorillonite Nanocomposites for Fused Deposition Modeling 3D Printing”, *Mater. Design*, Vol.102, 276-283, 2016.
- [2] Kim, M. K., Lee, I. H., Kim, H. C., “Effect of Fabrication Parameters on Surface Roughness of FDM Parts”, *Int. J. Precis. Eng. Man.*, Vol.19, No.1, pp.137-142, 2018.
- [3] Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H., Zhao, J., “Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS”, *Materials*, Vol.8, No.9, pp.5834-5846, 2015.
- [4] Lee, D., Kim, H., Sim, J., Lee, D., Cho, H., Hong, D., “Trends in 3D Printing Technology for Construction Automation Using Text Mining”, *Int. J. Precis. Eng. Man.*, Vol.20, No.5, pp.871-882, 2019.
- [5] Korpela, T., Suvanto, M., Pakkanen, T. T., “Friction and Wear of Periodically Micro-Patterned Polypropylene in Dry Sliding”, *Wear*, Vol.289, pp.1-8, 2012.
- [6] Nakano, M., 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.
- [7] Yoo, S. S., Heo, Y. Y., Kim, D. E., “Frictional Characteristics of Silicon Surface with Micro-Dimple Pattern”, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol.31, No.5, pp.451-457, 2014.
- [8] Bajpai, P. K., Singh, I., Madaan, J., “Tribological Behavior of Natural Fiber Reinforced PLA Composites”, *Wear*, Vol.297, No.1-2, pp.829-840, 2013.
- [9] Chin, C. W., Yousif, B. F., “Potential of Kenaf Fibres as Reinforcement for Tribological Applications”, *Wear*, Vol.267, No.9-10, pp.1550-1557, 2009.
- [10] Bustillos, J., Montero, D., Nautiyal, P., Loganathan, A., Boesl, B., Agarwal, A., “Integration of Graphene in Poly (lactic) Acid by 3D Printing to Develop Creep and Wear-resistant Hierarchical Nanocomposites”, *Polym. Composite.*, Vol.39, No.11, pp.3877-3888, 2018.
- [11] Torres, J., Coteló, J., Karl, J., Gordon, A. P., “Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives”. *JOM-J. Min. Met. Mat. S.*, Vol.67, No.5, pp.1183-1193, 2015.
- [12] Choe, S. Y., Nemati, N., Kim, D. E., “A Study on Wear Properties of Alloys in High Temperature Condition”, *Tribol. Lubr.*, Vol.35, No.1, pp.24-29, 2019, <https://doi.org/10.9725/kts.2019.35.1.24>
- [13] Kim, H. S., Jeon, H. G., Chung, K. H., “Effect of Sliding Speed on Wear Characteristics of Polyurethane Seal”, *Tribol. Lubr.*, Vol.34, No.2, pp.45-54, 2018, <https://doi.org/10.9725/kts.2019.35.2.45>