

# 온도 조건에 따른 폴리머 소재의 트라이볼로지 특성 연구

안치윤<sup>1</sup> · 김대은<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 대학원 기계공학과 석사과정생

<sup>2</sup>연세대학교 기계공학과 정교수

## Effects of Temperature on Tribological Properties of Polymer Material

Chi-Yoon An<sup>1</sup> and Dae-Eun Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Master Student, Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

(Received December 12, 2023 ; Revised December 29, 2023 ; Accepted December 29, 2023)

**Abstract** – Research to replace metal mechanical elements with polymer materials has recently accelerated. However, polymers exhibit less favorable mechanical properties than metal materials, and are often easily worn-out owing to frictional heat when their mechanical elements contact while in relative motion. Therefore, research on the polymer tribological properties is required to employ polymer materials in mechanical elements operating under harsh conditions. In this study, we examine the effect of mechanical part operating temperatures on the material friction and wear characteristics of polymer materials. We conduct ball-on-disk friction tests under dry conditions at various temperatures, using a metal ball with high hardness and a polymer as the counter surface. Each test is repeated at least three times to ensure the reliability of the test results. Before the friction test, we analyze the surface hardness and roughness of each polymer specimen; after the friction test, we use a three-dimensional confocal microscope to compare and analyze the polymer specimen wear characteristics. Based on this study, we systematically elucidate the polymer material tribological characteristics. This information should be useful for selecting and utilizing polymer materials at various temperatures.



© Korean Tribology Society 2023. 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** – Polymer(고분자 소재), Temperature(온도), Hardness(경도), Friction coefficient(마찰계수), Wear rate(마모율)

### 1. 서 론

산업의 고도화로 인해 첨단 산업에서 폴리머 사용 빈도가 증가하고 있다. 이는 폴리머 소재가 금속 소재에 비해 제조 방법이 비교적 간단하고 비용이 상대적으로 저

렴하며 무게가 가볍기 때문이다. 그러나 폴리머 소재는 금속에 비해서 기계적 강성이 약하며 특히 온도에 취약한 특성을 보인다[1]. 일반적으로 기계 소재로 쓰이는 SUS304 스테인리스 소재나 SUJ2 베어링 강은 경우 연속 사용 온도가 500°C 이상이지만 Engineering plastics의 연속사용 온도는 이에 미치지 못한다[2]. 특히 온도에 강한 것으로 알려진 내열성 폴리머인 PTFE, PEEK, PI의 경우에도 금속에 비해 연속 사용 온도는 떨어진다[3].

이러한 폴리머의 기계적 한계로 인하여 폴리머는 정밀

\*Corresponding author: Dae-Eun Kim  
Tel: +82-2-2123-2822, Fax: +82-2-312-2159  
E-mail: kimde@yonsei.ac.kr  
<https://orcid.org/0000-0002-6095-5138>

**Table 1. Service temperature of materials**

Material	PTFE	PEEK	PI	SUJ2
Service temperature (°C)	260	240	304	538

부품이나 고온의 특수환경에서 단독으로 사용하기보단, 금속 및 세라믹 소재의 적절한 배치와 구성으로 함께 사용된다. 이를테면 소형 Actuator에 부착되는 감속기 내부 구조, 고온 및 진공의 Sealing을 위한 금속 샤프트와 씰의 조합이 산업 현장에서 적용된 조합이다. 이는 고온의 환경 조건에서 금속과 폴리머의 트라이볼로지 연구 필요성을 보여준다. 특히 금속과 폴리머의 마찰 시 상대적으로 취약한 폴리머 온도에 따른 트라이볼로지 특성을 규명하는 것은 기계 요소 설계에 중요하다. 그럼에도 반도체 및 디스플레이 등의 특수 산업 및 공정에서 저온 특성에 따른 마찰 감소 특성에 대한 연구는 활발하게 진행된 반면, 폴리머가 취약한 고온 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다[4].

본 연구에서는 고온에서 Shore D경도를 측정 시스템을 구축하였고, 고온에서 Tribo-test를 수행할 수 있도록 장치를 구성하였다. 이를 통해 Ball-on-Disk 방식을 이용하여 3종의 폴리머(PTFE, PEEK, PI) 시편과 SUJ2 강구를 사용하였고, 실제 산업 현장에서 발생하는 마찰 마모 현상과 유사하게 설정하였다. 이를 통해 폴리머와 금속간 마찰 시 발생하는 마찰계수와 마모율, 각각의 경도와 마모트랙을 확인하여 그 메커니즘을 규명하고자 하였다.

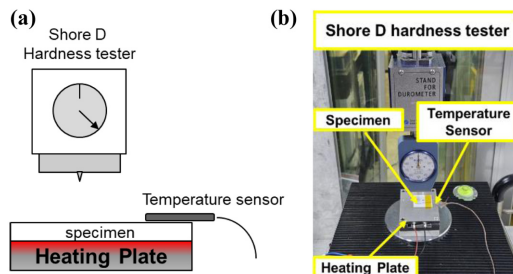
## 2. 연구방법 및 내용

### 2-1. 시편 준비

본 연구에서는 가로와 세로가 각각 20 mm × 20 mm이고, 두께가 5 mm인 시편을 사용하였다. PTFE의 경우 Dupont 사의 Teflon 제품을 사용하였고, PEEK의 경우 Mitsubishi 사의 Ketron을 사용했다. PI의 경우 Dupont 사의 Vespel 제품을 사용하였다. 강구의 경우 직경 5.56 mm SUJ2 볼을 사용하였다. 각각의 폴리머 시편은 표면 조도( $R_a$ )를 일정하게 유지하기 위해 Polishing을 수행했으며, 시편의 평균  $R_a$ 는 1.7 mm 수준으로 균일하게

**Table 2. Mechanical properties of specimens[5].**

Material properties	PTFE	PEEK	PI	SUJ2
Young's modulus (GPa)	1.6	3.6	2.5	210
Poisson's ratio	0.46	0.39	0.34	0.27
Yield strength (MPa)	24	120	73	433



**Fig. 1. (a) Schematic drawing of high temperature Shore D tester, (b) High temperature Shore D hardness tester.**

유지하였다. 시편과 볼의 기계적 특성은 Table 2의 내용에 정리하였다.

### 2-2. 측정 장비 준비

폴리머의 특성상 비커스 경도기를 이용하게 되면 압입흔이 Polymer의 Elastic recovery로 인하여 경도가 수 배 더 낮게 측정된다[6]. 그렇기 때문에 고무나 폴리머 측정에 적합한 Shore D 경도계를 준비하였다. 특히 온도를 설정하여 경도를 측정하기 위해서 Heating plate와 Thermal sensor를 설치하여, Room temperature에서 200C까지 50°C 간격으로 측정할 수 있도록 구성하였다. 구체적인 측정 방법은 Fig. 1와 같다.

### 2-3. 실험 장비 준비

Ball-on-Disk 타입의 실험을 수행하면서, 온도 외의 변수를 차단하기 위해 Chamber를 활용하여 외부 습도 차단과 열평형을 유도하였다. 온도 측정은 2가지 방법을 활용하여 교차 검증하는 방식을 활용하였다. Ball-on-Disk 실험대에 온도를 높일 수 있도록 최대 온도 400C의 할로겐 램프를 설치하였다. 온도 센서를 시편의 위치와 평행한 곳에 측정 스탠드를 설치하여 시편의 온도를 간접적으로 측정할 수 있도록 구성하였고, 설정 온도 값과 실제 측정 온도가 동일하도록 Off set하여 Calibration을 진행하였다. 그 다음 실험에 사용할 Ball 위치의 온도를 측정하여, 두 데이터가 겹치도록 측정 위치를 조정하였다. 실험 장비와 측정 센서 설치 방법은 Fig. 2와 같다.

### 2-4. 실험 조건

3종의 폴리머에 대한 온도 별 경도 측정과 마찰 실험은 각각 Dry condition에서 수행되었으며, 각 실험은 최소 3회 이상을 반복하였다.

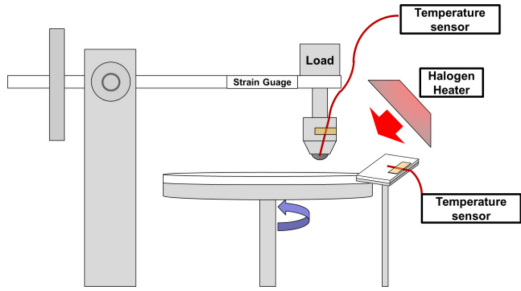


Fig. 2. Temperature Calibration Schematic Drawing.

Table 3. Shore D hardness test conditions

Hardness Test	Shore D
Humidity (%)	25
Temperature (°C)	RT, 50, 100, 150, 200

Table 4. Tribo-test conditions

Normal Load (N)	3
Radius of wear track (mm)	5
RPM	100
Linear velocity (mm/s)	52.3
Cycle	2000
Humidity (%)	25
Temperature (°C)	RT, 50, 100, 150, 200

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 경도 분석

PTFE, PEEK, PI 세 종류의 시편 모두 온도가 상승함

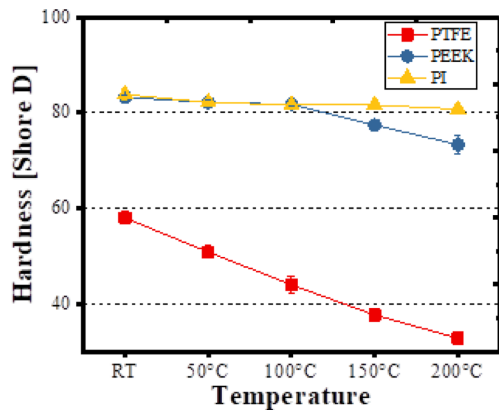


Fig. 3. Hardness measurement results according to temperature.

에 따라 경도가 하강하는 경향을 보인다.

온도가 상승하면 밀도가 낮아진다. 밀도와 경도의 직접적인 상관관계는 없으나, 온도가 상승함에 따라 반결정 상태인 폴리머가 연화 하였고, 이는 경도가 감소한 원인으로 보인다. PTFE에서 가장 두드러지며, PEEK도 100°C 이후에 경도 하락이 심화된다.

#### 3-2. 마찰계수 분석

PTFE의 경우 온도가 증가하면서 마찰계수가 감소하

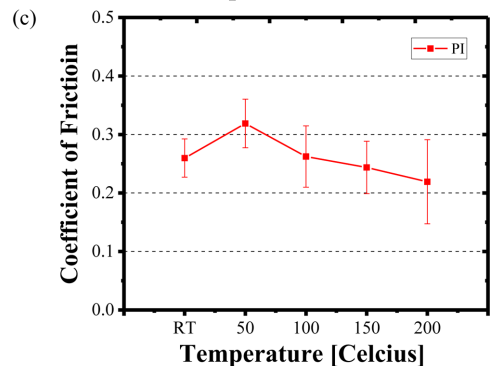
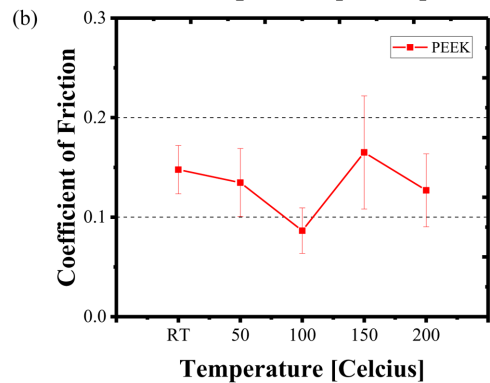
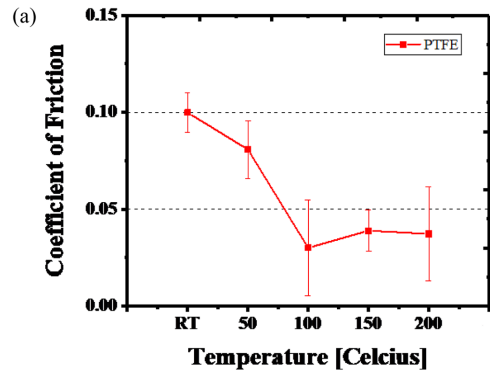


Fig. 4. (a), (b), (c) Friction coefficient graph by temperature of PTFE, PEEK, PI respectively.

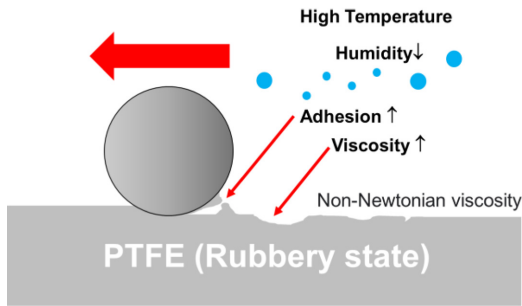


Fig. 5. Friction and wear mechanisms of PTFE specimens reaching the glass transition temperature.

다가 100°C 전후로 마찰계수가 반등한다. PEEK의 경우에도 100°C 전후로 마찰계수가 반등한다. PI의 경우 50°C에서 마찰계수가 상승했다가 온도가 상승함에 따라 마찰계수가 하락한다. 그러나 절대적인 수치로 보면 PI > PEEK > PTFE 순으로 마찰계수가 측정되었다.

PTFE의 경우 100°C까지 온도가 상승함에 따라 시편 표면의 전단 응력이 저하되어 마찰계수가 떨어지는 거동을 보인다. 하지만 100°C 이후에 온도가 지속적으로 상승하면서 마찰계수가 다소 상승하며 그 원인은 다음으로 유추할 수 있다.

마모와 변형으로 인해 접촉 면적이 증가하여 마찰계수가 증가한다.

폴리머가 유리전이 온도에 도달하여 Rubbery state에 도달하는데, 비뉴턴 점성(Non-Newtonian Viscosity)의 특성으로 인해 온도가 상승함에 따라 표면의 점성이 오히려 상승하여 마찰계수가 증가한다[7].

온도가 상승하면 수분이 증발하므로 주변의 습도가 낮아지고 마찰 거동에 영향을 준다.

이러한 비뉴턴 점성의 특성은 Shear stress에 의해서만 강화되거나 약화되는데, 경도의 경우 수직에서 측정하므로, 비교적 선형적인 결과가 나온 반면, 비뉴턴 점성에 영향을 받은 마찰 실험의 경우 마찰계수의 값이 다르게 나타나는 것을 설명할 수 있다.

PEEK의 경우 100°C까지 온도가 상승함에 따라 표면의 전단 응력 저하로 인해 마찰계수가 낮아진다. 하지만 유리전이 온도 부근인 150°C 전후로 PEEK의 열팽창계수는 2.4배 가량 증가한다[8]. 따라서 부피의 팽창이 볼록의 접촉부에 응력을 집중시키면서 일시적인 마찰계수 상승을 발생한 것으로 보인다.

PI의 경우 50°C 구간까지 마찰계수가 다소 상승하는데, 이는 온도가 올라감에 따라 주변의 습도가 줄어들어 마찰계수 상승에 영향을 준 것으로 보인다. 반면 PEEK

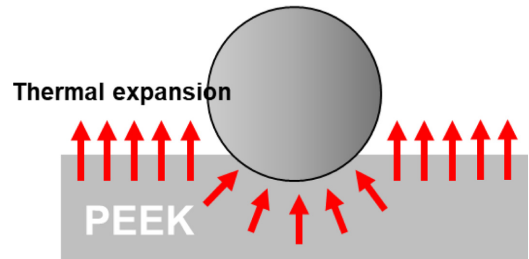


Fig. 6. Stress concentration mechanism due to thermal expansion in PEEK.

의 경우 흡습성이 매우 낮은 소재로 실험 시 수분의 영향을 덜 받는다[9]. 이후 온도가 상승함에 따라 비교적 선형적으로 마찰계수가 감소한다.

### 3-3. 마모율 및 마모 트랙 분석

각각의 폴리머 시편의 Wear track으로부터 추출한 Wear area를 기반으로 Wear rate를 산출하였으며, 그 결과는 Fig. 7과 같다.

PTFE의 경우 온도가 증가함에 따라 마모율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 다만 100°C에서 유리전이 온도에 도달하기 전 마찰계수가 최소값을 보였기 때문에, 마모율이 오히려 낮아졌고, 이후 유리전이온도로 인해 마모의 메커니즘이 변화했기 때문에 마모율이 다시 상승한다고 해석할 수 있다. PEEK의 경우 가장 낮은 마모율을 보이며, PI 또한 낮은 마모율을 보인다.

Fig 8의 마모 트랙을 보면 비교적 저온에서는 매끄러운 마모 트랙을 나타내지만, 100°C 부터 온도가 상승할 때마다 표면의 굴곡이 더욱 심해지는 것을 확인할 수 있다. 이는 110~130°C에서 형성되는 PTFE의 유리 전이

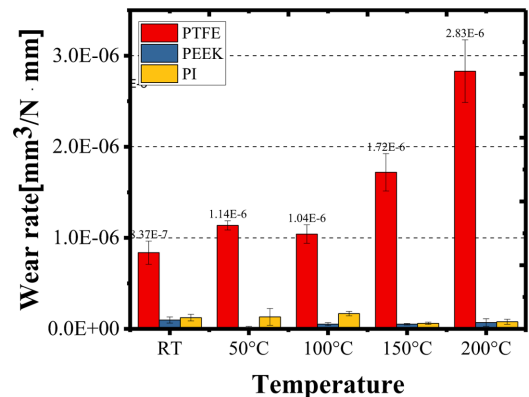


Fig. 7. Wear rate graph of PTFE, PEEK, PI.

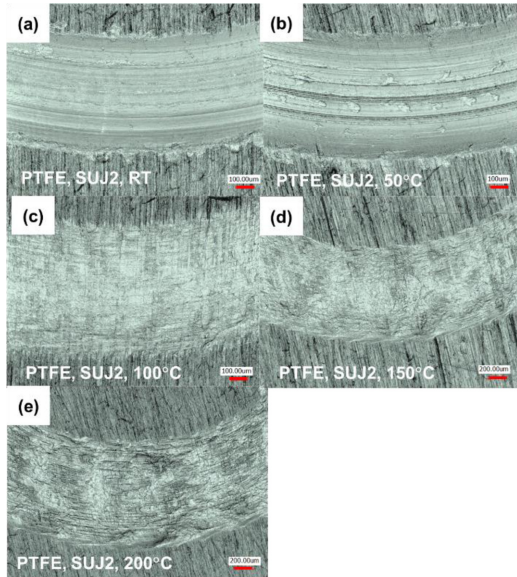


Fig. 8. (a-e) Wear track of PTFE; RT, 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, respectively.

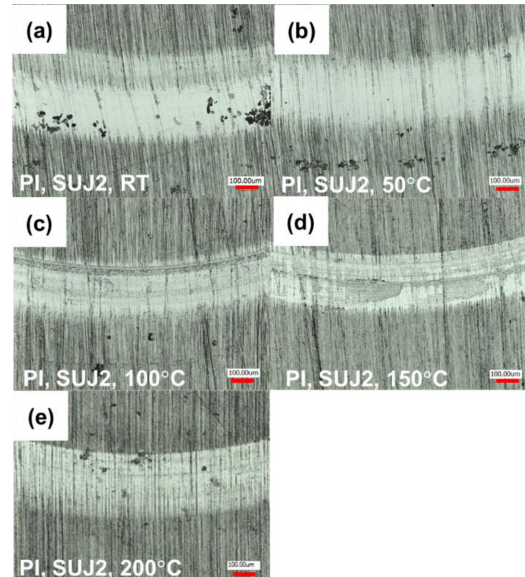


Fig. 10. (a-e) Wear track of PI; RT, 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, respectively.

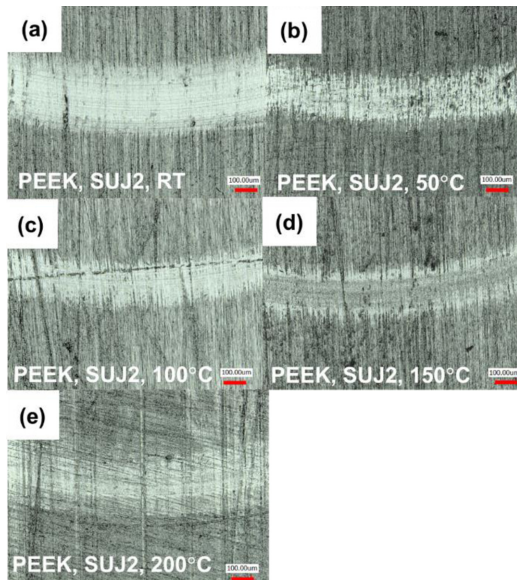


Fig. 9. (a-e) Wear track of PEEK; RT, 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, respectively.

온도에 의해, 소재가 Rubbery state로 변화하였고 이때 비 뉴턴 점성 특성으로 인해 오히려 마찰계수가 상승하는 현상과 일치한다.

PEEK의 마모 트랙을 봤을 때, PTFE의 마모 형상에 비해 확연히 작다. Fig 10의 PI마모흔적과 마모 면적을

비교해도 작다. 이는 PEEK가 유리전이 온도에 도달했을 때, PTFE와 유사한 형태로 비뉴턴 점성의 특성을 갖지 않는다는 것을 시사한다. Fig. 9(a-c)에 비해 (d)와 (e)의 마모 트랙 중심에 더 깊은 흔적을 갖고 있음을 알 수 있다.

이를 미루어 보았을 때 열팽창으로 인한 응력 집중 현상이 보다 가능성이 높을 것으로 보인다. PI의 마모 트랙에서는 비교적 마모로 인한 Particle이 많이 발생한 것을 확인할 수 있다. PI의 경우 유리 전이 온도가 300°C 이상이므로, PTFE와 PEEK와 같은 열변형 효과를 확인할 수 없었다[10,11].

#### 4. 결 론

본 연구에서는 PTFE, PEEK, PI 소재와 SUJ2 강구 간의 마찰 실험을 수행하면서 온도에 따른 각 폴리머의 트라이볼로지 특성을 관측하고 규명하고자 하였다. Shear stress에 의한 마찰 및 마모 분석 외에도 온도에 따른 In-situ 경도 측정을 수행하였다. Tribo-test를 통해 온도에 따른 마찰계수, 마모율, 마모트랙을 확인하였고 추가적으로 경도를 확인하였다. 앞선 데이터를 분석하여 추론한 결론은 아래와 같다.

PTFE: 비뉴턴 점성 특성을 갖는 고분자 소재의 경우 유리 전이 온도에서 마찰계수가 상승할 수 있다.

PEEK: 유리 전이 온도 전후로 열팽창계수가 급격히 변하는 소재로 열팽창이 마찰 특성에 영향을 줄 수 있다.

PI: 흡습성이 뛰어난 폴리머의 경우 고온 실험 시 초기 마찰계수에 영향을 줄 수 있다.

고온에서 폴리머의 경도는 비교적 선형적 특성을 갖는다.

### Acknowledgements

본 연구는 2023년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0019808, 국제공동기술개발사업).

### References

- [1] Brostow, W., Deborde, J. L., Jaclewicz, M., Olszynski, P., "Tribology with emphasis on polymers: friction, scratch resistance and wear" *Journal of Materials Education*, Vol.25(4/6), pp.119-132, 2003.
- [2] Choe, S. Y., Narguess Nemat, Kim, D. E., "A Study on Wear Properties of Alloys in High Temperature Condition", *Tribology and Lubricants*, Vol.35, No.1, pp.24-29. 2019, <https://doi.org/10.9725/kts.2019.35.1.24>
- [3] Gangineni, P. K., Gupta K, B. G., Patnaik, S., Prusty, R. K., Ray, B. C. "Recent advancements in interface engineering of carbon fiber reinforced polymer composites and their durability studies at different service temperatures" *Polymer Composites*, Vol.43, No.7, pp.4126-4164, 2022.
- [4] Wang, Q., Zheng, F., Wang, T. "Tribological properties of polymers PI, PTFE and PEEK at cryogenic temperature in vacuum", *Cryogenics*, Vol.75, pp.19-25, 2016.
- [5] Bijwe, J., Sen, S., Ghosh, A. "Influence of PTFE content in PEEK-PTFE blends on mechanical properties and tribo-performance in various wear modes" *Wear*, Vol.258, No.10, pp.1536-1542, 2005.
- [6] Lawn, B. R., Howes, V. R. "Elastic recovery at hardness indentations" *Journal of Materials Science*, Vol.16, pp. 2745-2752, 1981.
- [7] Malkin, A. Y. "Non-Newtonian viscosity in steady-state shear flows" *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol.192, pp. 48-65, 2013.
- [8] Barnes, J. A., Simms, I. J., Farrow, G. J., Jackson, D., Wostenholm, G., Yates, B. "Thermal expansion characteristics of PEEK composites" *Journal of materials science*, Vol.26, pp.2259-2271, 1991.
- [9] Fujita, S., Y. Kamei. "Electrical properties of polyimide with water absorption." Proceedings. 11th International Symposium on Electrets. *IEEE*, 2002.
- [10] Yokota, R., Yamamoto, S., Yano, S., Sawaguchi, T., Hasegawa, M., Yamaguchi, H., ... Sato, R. "Molecular design of heat resistant polyimides having excellent processability and high glass transition temperature" *High Performance Polymers*, Vol.13, Vol.2, pp.S61-S72. 2001.
- [11] Lee, S.-H., Kim, H.-J., "A Molecular Simulation on the Adhesion Control of Metal Thin Film-Carbon Nanotube Interface based on Thermal Wetting", *Tribology and Lubricants*, Vol 39, No.1, pp.8-12. 2023, <https://doi.org/10.9725/kts.2023.39.1.8>