

# 스마트폰 카메라용 액추에이터 볼구름면 마찰 측정 시스템 설계 및 검증

## Design and Verification of a Tribo-system for Measuring Ball-raceway Rolling Friction in Smartphone Camera Actuators

박주호<sup>1</sup>, 홍정하<sup>1</sup>, 민상준<sup>1</sup>, 이규선<sup>1,#</sup>  
Ju Ho Park<sup>1</sup>, Jung Ha Hong<sup>1</sup>, Sang Jun Min<sup>1</sup>, and Gyu Sun Lee<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> LGO|노텍 광학솔루션 연구소 (Optics Solution Research Center, LG Innotek)  
# Corresponding Author / E-mail: gslee@lginnotek.com  
ORCID: 0009-0004-2545-7020

KEYWORDS: Rolling friction (구름마찰), Ball guide actuator (볼가이드 액추에이터), Displacement-Friction force graph (변위-마찰력 선도), Ball-raceway (볼구름면), Rolling friction tribo-system (구름마찰 트라이보시스템)

*This study presents a rolling tribometer designed to quantitatively assess ball-raceway friction in ball-guided bearings, which is critical for applications such as smartphone camera actuators, where friction impacts power consumption. Following ASTM G133 standards, the tribometer was validated using LCP and PC materials under both short-cycle (10K cycles) and long-cycle (1M cycles) tests. Under short-cycle conditions, LCP exhibited an average coefficient of friction (COF) of 0.011, while PC demonstrated a COF of 0.009, both showing low variability at 2.7% and 4.4%, respectively. In long-cycle testing, LCP maintained stable friction coefficients, whereas PC experienced a significant COF increase around 200K cycles due to wear. Confocal microscopy revealed that the wear volume of PC was approximately 10 times greater than that of LCP after 1M cycles. Displacement-friction force analysis indicated increased energy dissipation in PC, attributed to wear-induced surface asperities. This rolling tribometer provides a reliable method for evaluating friction coefficients and long-term durability, yielding valuable data for optimizing actuator design and enhancing efficiency and lifespan in ball-guided mechanisms. The quantitative friction data generated can significantly improve the performance of ball-guided systems.*

Manuscript received: August 27, 2025 / Revised: September 25, 2025 / Accepted: November 24, 2025

### NOMENCLATURE

COF = Coefficient of Friction  
LCP = Liquid Crystal Polymer  
PC = Polycarbonate

### 1. 서론

회전하는 축에 가해지는 하중을 안정적으로 지지하여 동력을 효율적으로 전달하기 위해 일반적으로 베어링을 사용한다.

볼베어링을 이용한 볼 구름 베어링은 구름(Rolling) 접촉을 통해 마찰과 마모를 저감시켜 기계의 효율을 높이고 수명을 늘리는데 필수적이다[1-3].

볼 구름 베어링의 마찰, 마모 특성은 볼 및 볼구름면의 재질, 표면 거칠기, 윤활의 종류 등 다양한 요소들에 의해 결정된다. 그러므로 이런 요소들의 변화에 따른 볼 구름 베어링의 수명과 마찰 특성을 이해하는 것이 중요하다. 이를 평가하기 위한 실험 장비 역시 베어링 제조 기술의 발전에 따라 다양하게 개발되어 왔다. 베어링의 특성을 파악하기 위한 대표적인 실험 방법으로 동력 원인 모터의 축에 베어링을 장착하고 일정 하중을 부여하여 발생하는 토크를 측정함으로써 마찰 특성을 파악한다[4,5]. 또한

장수명 실험을 진행함으로 표면에 발생하는 마모를 분석하여 이를 저감할 수 있는 최적의 재료 조합과 구조를 선정하고, 수명을 평가한다[6,7].

전통적인 볼 구름 방식의 베어링 이외에도 볼 구름 방식을 활용한 예는 다양하다. 그 중 스마트폰 카메라용 액추에이터에서 볼 구름 베어링 방식을 활용하는데, AF (Auto Focus)와 OIS (Optical Image Stabilization) 기능을 구현하기 위해 Ball Guide Actuator 구조가 적용되었다.

스마트폰의 카메라 모듈은 미세 구조 내에서 최대한의 성능을 발휘해야 한다. 적은 전류로 AF, OIS 기능을 구현하기 위해 그간 VCM (Voice Coil Motor) 기반의 구동력을 Spring & Wire 방식으로 제어하여 전달하여 왔다. 하지만 소비자들의 고사양 스마트폰 카메라에 대한 수요로 인해 렌즈 무게가 늘어나고, 렌즈를 이송하기 위해 사용하는 전류 소모량이 증가하였다. 전류 소모는 곧 스마트폰 전력 사용과 직결되므로 스마트폰의 효율을 높이기 위해 Ball Guide 구조를 활용하여 제어하는 기술이 도입되었다[8].

Ball Guide Actuator는 이동체간 적은 마찰을 구현하여 사용 전류를 최소화할 수 있지만, 형상이 복잡하고 볼이 구르는 구름면 형상이 마찰 특성에 큰 영향을 미친다. 따라서 이에 대한 설계와 가공이 중요하다. 일반적으로 볼 재질로 세라믹 볼을 사용하고 있으며, 볼구름면은 치수 정밀도를 높이기 위해 사출품을 사용한다. 세라믹과 사출품이 맞닿은 구조로서 경도 차이가 크기 때문에 외부 충격에 의한 볼 덴트(Ball Dent)가 쉽게 발생하여 구름면 재질의 표면 경도를 높이는 것이 중요하며, 볼 구름 저항성을 낮추는 조합의 선정이 중요하다. 하지만 볼과 구름면 간 구름 저항을 직접적으로 측정하는 방법은 존재하지 않으며, 액추에이터 단품으로부터 Input 대비 사용된 Output 전류를 비교하여 마찰계수를 추정할 뿐이다. 기구 설계자 관점에서는 볼구름면 간 구름 마찰계수를 설계 과정에 적용하여야 하기 때문에 정량적으로 평가하는 것이 중요하다.

이러한 필요에 따라 본 연구에서는 볼-구름면 간 구름 마찰을 측정할 수 있는 시스템을 개발하고, 본 시스템을 검증하기 위해 몇 가지 실험을 수행하여 시험기의 적정성을 판단하였다. 시험기의 기본적인 특성은 ASTM G133에 기반하여 제작되었다[9,10]. 기존의 시험기는 미끄럼 접촉(Sliding Contact) 기반의 실험 용도로만 사용되었는데 본 연구에서는 상하에 구름면 시편을 고정시키고 시편 사이에 볼을 위치함으로써 볼-구름면 간 구름접촉을 재현할 수 있도록 설계하였다.

## 2. 실험 장비

### 2.1 Rolling Tribometer 설계 및 제작

구름 마찰 실험을 하기 위한 전용 장비로서 ASTM G133에 기반하여 시험기를 자체 제작하였다. 구동을 위한 모터는 INA Oriental 社の Stepping Motor를 사용하였다. 마찰력과 수직하중을

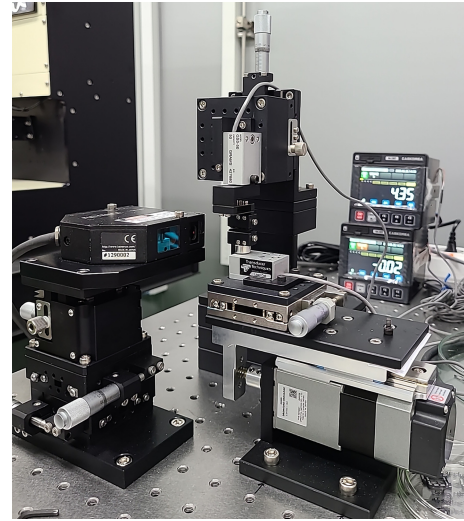


Fig. 1 Rolling tribometer for measuring ball-raceway rolling friction

관찰하기 위해 각각 Loadcell을 장착하였고, 데이터 취득을 위해 DAQ를 사용하였다. 시편의 정확한 접촉을 구현하기 위해 하단 시편에 Y방향 Stage를 장착하였고, 하중은 Z방향 Stage로 부여한다. 접촉이 잘 이뤄지는지를 관찰하기 위해 X방향과 Y방향에 카메라를 장착하였고, Ball 접촉상태를 실시간으로 확인 가능하다. 시편의 X방향 변위를 관찰하기 위해 X방향으로 변위 센서를 장착하였다. Fig. 1은 실제 시험기 사진이며, Fig. 2(b)는 볼과 상하 구름면간 접촉 형태를 나타내는 모식도이다.

### 2.2 시편 제작

볼 구름면 시편을 모사하기 위해 2점 접촉을 할 수 있도록 45도 각도를 가진 V-shape(45) Raceway와 1점 접촉을 하도록 넓은 구름면을 가진 U-shape (flat) Raceway 시편을 금형으로 제작 및 사출하였다. 이는 실제 부품의 접촉면을 기반으로 유사한 형태로 제작한 것이다.

Fig. 2(a)는 볼 구름면 시편의 형상을 나타낸다. 시편의 소재는 LCP (Liquid Crystal Polymer), PC (Polycarbonate) 이며 상대재는 0.9Φ 세라믹 볼이다.

### 2.3 실험 조건

시험기의 적정성을 확인하기 위해 2종의 레진을 사출하여 2가지 실험을 계획하였다. 첫번째는 마찰 계수의 시험간 편차를 확인하기 위한 Long Stroke (800 μm)/ Short Cycle (10K cycles)/ 2 Hz (3.2 mm/s) 실험이다. 본 실험을 통해 반복 실험 시 동일한 수준의 평가 결과가 재현되는지 관찰한다. 10K cycles동안 마찰계수는 400 cycles마다 20초간 실시간으로 획득하였다. (초당 500개 데이터 획득) 두번째는 본 시험기의 장수명 평가 적정성을 확인하기 위해 Short Stroke (400 μm)/ Long Cycle (1M cycles)/ 4 Hz (3.2 mm/s) 실험을 진행하였다. 장수명 실험은 10K cycles마다 10초간 마찰계수를 측정하였다. (초당 500개 데이터 획득) Long Cycle실험 시, 마찰계수의 변화와 마모 발생 여부를 통해 시험

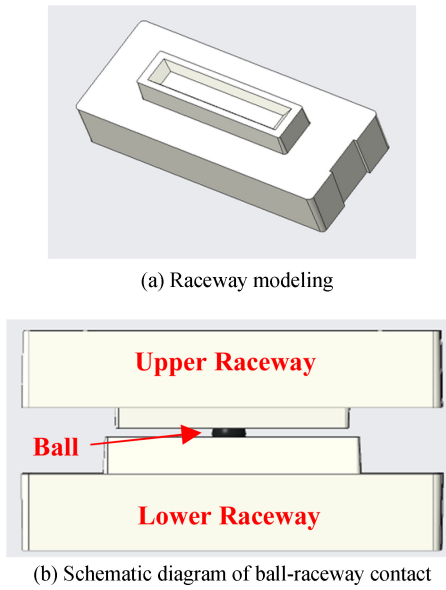


Fig. 2 The schematic diagram of ball-raceway contact

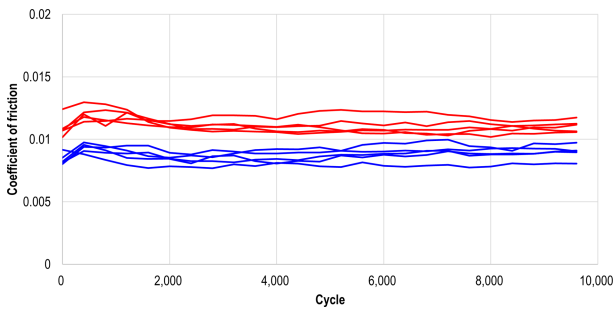


Fig. 3 COF (Coefficient of friction) of LCP (Red) and PC (Blue) for 10K cycles

기와 실험의 유효성을 관찰한다.

수직하중은 실제 접촉 환경에 기반하여 230 mN 부여, 상온에서 실험을 수행하였다. 실제 액추에이터의 볼-구름면에서 일반적으로 Grease를 사용하기 때문에 본 실험에서도 표면에 Grease를 도포하였다(주도: 310, 25°C/60W, KS M ISO 2137). Grease 도포는 U Raceway에는 1점, V Raceway에는 각 경사면에 1점씩 도포하였으며 도포량은 한 점당 0.04–0.08 mg이다. 각 실험은 7회 실험 후, 최솟값과 최댓값을 제외하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 Long Stroke / Short Cycle 구름 마찰 실험

마찰계수를 구하는 방법은 다음과 같다. 초당 500개의 마찰계수를 획득하여 각 Cycle당 상위 20%에 해당하는 값들의 평균을 계산하여 산출하였다. 그 결과, LCP와 PC의 평균마찰계수는 각각 0.011, 0.009로 LCP가 PC에 비해 약 0.002 높다. 10K cycles까지 두 소재 모두 마찰계수 변화는 없으며,

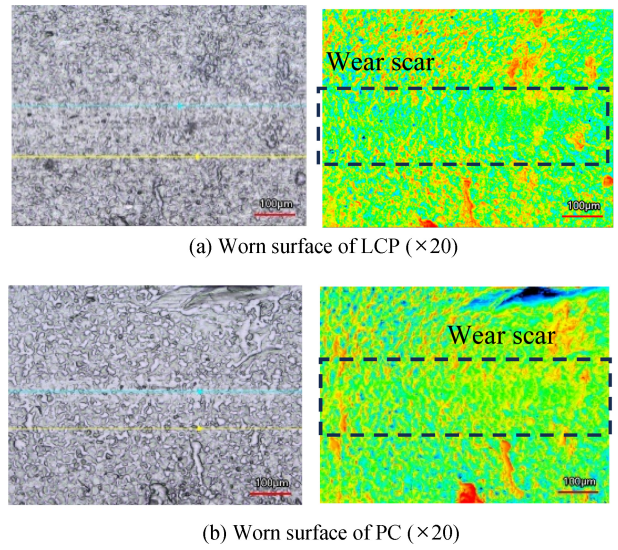


Fig. 4 Confocal images of worn surfaces after 10K cycles (x20)

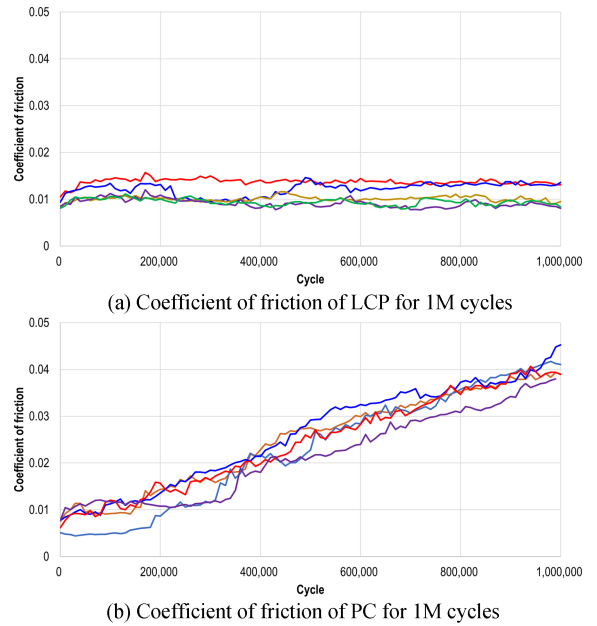


Fig. 5 COF of LCP and PC for 1M cycles

시료간 편차는 있으나 각각 표준편차 0.0003, 0.0004로 반복성에 문제없는 수준이다(Fig. 3). 표준편차 대비 평균으로 정의되는 상대표준편차(데이터가 평균으로부터 얼마나 흩어져 있는지에 관한 척도)는 각각 2.7%, 4.4%로 5% 이내의 실험 반복성을 나타내고 있다.

10K cycles 이후 표면에서 발생하는 마모를 관찰하기 위해 Keyence 社의 Confocal Laser Microscope를 사용하였다. Fig. 4는 본 장비를 사용하여 LCP, PC 표면을 각각 촬영한 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 표면 돌기(Asperities)가 평탄화되는 정도인 길들이기(Run-in) 과정을 거치고 있음을 알 수 있다. 길들이기 과정에서는 정량적인 마모량 측정이 어렵기 때문에 두 재질간 마모량 비교는 어렵다.

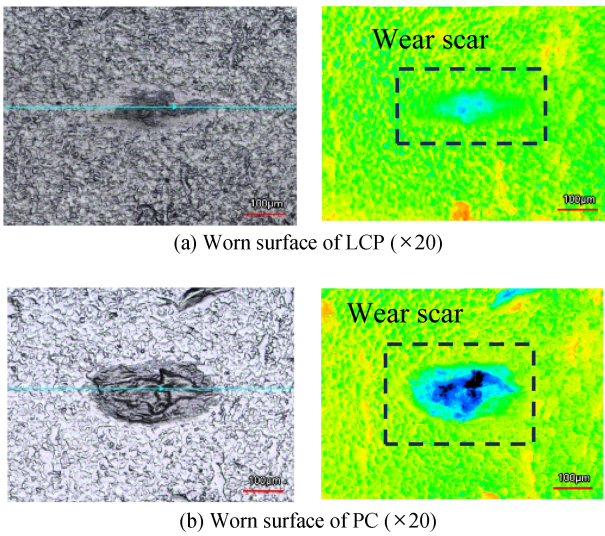


Fig. 6 Confocal images of worn surfaces after 1M cycles (x20)

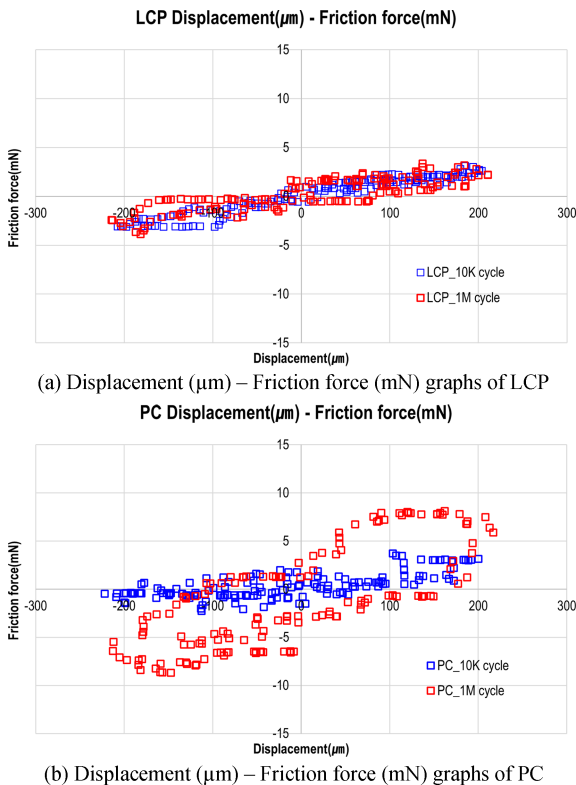


Fig. 7 Comparison of displacement (μm) – Friction force (mN) graphs for LCP and PC at 10K and 1M cycles

3.2 Short Stroke / Long Cycle 구름 마찰 실험

Fig. 5는 1M cycles동안 실험한 마찰계수 그래프이다. 10K까지 실험한 결과와 달리 1M cycles 실험 시에는 각 재료의 특성이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. LCP는 실험 초반부터 1M cycles까지 마찰계수의 큰 변화가 없다. 반면, PC는 약 200K cycles을 기점으로 마찰계수가 상승하는 경향을 보인다. 마찰계수의 상승은 일반적으로 표면의 변화, 즉 마모와 관련이 깊다. 이를 관찰하기 위해 1M cycles 실험 후 표면을 관찰하였고,

이는 Fig. 6과 같다. LCP 표면은 마모량이 적었고 일부 시편은 마모량 측정이 불가능했다. 반면, PC 표면은 마모가 상당히 발생하였으며, LCP에 비해 평균 10배 이상의 마모량(LCP: 9,285 μm<sup>3</sup>, PC: 142,565 μm<sup>3</sup>)을 가진다.

3.3 변위-마찰력 선도

Fig. 7은 LCP, PC에 대한 변위-마찰력 선도이다. 변위-마찰력 선도는 변위에 따른 마찰력을 관찰하여 정지-운동 마찰 이력을 확인하는데 유용하다[11,12]. 일반적으로 미끄럼 마찰(Sliding Friction) 환경에서 분석되며, 마찰 이력 곡선을 통해 시스템의 마찰 거동을 유추하거나, 마찰 에너지 소산(Dissipation Energy)을 계산하기도 한다[13].

본 논문에서 개발한 시험기는 구름 마찰 환경이기 때문에 마찰력이 매우 작아 거동을 분석하기는 어렵지만, Cycle 증가에 따른 마찰력의 변화를 변위-마찰력 선도를 통해 분석하면 보다 직관적이고, 마찰 에너지의 크기를 명료하게 비교 가능하다.

Fig. 7은 10K cycles 및 1M cycles에서 발췌한 LCP와 PC의 변위-마찰력 선도이다. LCP의 경우, 10K cycles에서나 1M cycles에서 마찰력 차이가 없다. 즉 마모로 인한 표면 변화 혹은 반복 접촉에 의한 표면전이층 등이 발생하지 않았음을 의미한다. 반면, PC의 경우 10K와 1M cycles일 때 마찰력의 차이가 크다. 앞서 살펴본 바와 같이 일정 cycles 이후 표면에 발생한 마모로 인해 구름면에서 Ball이 요철을 극복하며 움직일 때 받는 마찰이 증가한다. 이 마찰에너지의 양은 변위-마찰력 선도가 나타내는 면적으로 구할 수 있다.

4. 결론

볼과 구름면에서 발생하는 마찰계수를 측정하고, 트라이볼로지 특성을 관찰하기 위한 구름마찰 시험기를 개발하였고 이를 검증한 결과는 아래와 같다.

Short Cycle 실험을 통해 볼 구름 마찰계수를 측정하였고, 세라믹 볼에 대한 LCP, PC의 평균마찰계수는 각각 0.011, 0.009이다. 각 시료 군 내에서 데이터가 평균으로부터 흩어진 정도를 파악할 수 있는 상대표준편차는 각각 2.7%, 4.4% 로 5% 이내의 실험 반복성을 나타낸다.

Long Cycle 실험을 한 결과, LCP는 1M cycles 동안 마찰계수의 큰 변화가 없는 반면, PC는 약 200K cycles 시점부터 마모가 발생하여 마찰계수의 상승을 이끌었다. 반복 Cycle에 따라 재료별 표면 마모 시점이 다르고 마찰계수의 추이도 다른데, 이는 Rolling 시험기의 장수명 평가가 재료간 마모 발생 시점과 마찰계수 추이를 파악하는데 용이하며 Rolling 시험기가 이에 적절한 용도로 개발되었음을 알 수 있다.

변위-마찰력 선도를 통해 볼 구름에 따른 마찰력의 거동을 직관적으로 파악할 수 있다. LCP는 10K cycles이나 1M cycles에서 선도가 유사하나, PC는 10K cycles에 비해 1M cycles에서

면적이 넓어졌다. 이는 PC의 경우, 표면에 마모가 발생하였고, 이로 인한 마찰 증가가 열에너지 소실로 이어졌음을 의미한다.

## REFERENCES

1. Presilla, R., Wandel, S., Stammler, M., Grebe, M., Poll, G., Glavatskih, S., (2023), Oscillating rolling element bearings: A review of tribotesting and analysis approaches, *Tribology International*, 188, 108805.
2. Gimeno, S., Mescheder, H., Quintana, I., Gasion, A., Arias-Egido, E., Carbonell, A., Mallo, C., Miguel, I., Paredes, J., Zalakain, I., (2023), Effect of different laser texturing patterns on rolling contact surface and its tribological & fatigue life behavior on 100Cr6 bearing steel, *Wear*, 522, 204717.
3. Laithy, M., Wang, L., Harvey, T., Viernusel, B., Correns, M., Blass, T., (2019), Further understanding of rolling contact fatigue in rolling element bearings- A review, *Tribology International*, 140, 105849.
4. Peterson, W., Russel, T., Sadeghi, F., Berhan, M.T., (2021), Experimental and analytical investigation of fluid drag losses in rolling element bearings, *Tribology International*, 161, 107106.
5. Presilla, R., Calderon-Salmeron, G., Leckner, J., Kitamura, R., Sato, K., Sasaki, S., Glavatskih, S., (2025), Lubricant design for oscillating rolling bearings: Greases, ionic liquids, and friction torque, *Tribology International*, 210, 110721.
6. Xia, Z., Wu, D., Zhang, X., Wang, J., Han, E., (2024), Rolling contact fatigue failure mechanism of bearing steel on different surface roughness levels under heavy load, *International Journal of Fatigue*, 179, 108042
7. Deshwal, D., Belgamwar, S. U., Bekinal, S. I., (2025), Assessment of polytetrafluoroethylene composites for deep groove ball bearing applications through free run and rolling contact fatigue tests, *Scientific Reports*, 15(1), 10088.
8. Kim, C., Song, M.-G., Kim, Y., Park, N.-C., Park, K.-S., Park, Y.-P., Shin, K. S., Kim, J. G., Lee, G. S., (2013), Design of an auto-focusing actuator with a flexure-based compliant mechanism for mobile imaging devices, *Microsystem Technologies*, 19(9), 1633-1644.
9. Bae, J., Chung, K. H., (2018), Degradation progression of polyurethane hydraulic reciprocating seal, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 35(7), 701-706.
10. Park, T.L., Yang, Y.M., Shin, D.G., Kim, D.E., (2018), A study on frictional characteristics of PDMS under various conditions, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 35(8), 803-807.
11. Bazrafshan, M., de Rooij, M.B., Schipper, D.J., (2019), The effect of adhesion and roughness on friction hysteresis loops, *International Journal of Mechanical Sciences*, 155, 9-18.
12. Biswas, S., Chatterjee, A., (2015), A two-state hysteresis model from high-dimensional friction, *Royal Society Open Science*, 2(7), 150188.
13. Li, Y., Zhao, T., Li, Y., Chen, Y., (2022), A five-parameter constitutive model for hysteresis shearing and energy dissipation of rock joints, *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(4), 737-746.



### Ju Ho Park

Ph.D., Senior researcher of Actuator Technology Development team, LG Innotek. His research interest is Tribology.  
E-mail: jpark318@lginnotek.com



### Jung Ha Hong

M.S., Head of Optic Solution Business Research Center, LG Innotek. His research interest is Camera & sensing module optical technologies for mobile, robotics, mobility.  
E-mail: jhhonga@lginnotek.com



### Sang Jun Min

M.S., Leader of Actuator Technology Development team, LG Innotek. His research interest is Compact precision actuator technologies for mobile, robotics and mobility.  
E-mail: sjmina@lginnotek.com



### Gyu Sun Lee

Ph.D., Professional researcher of Actuator Technology Development team, LG Innotek. His research interest is Tribology.  
E-mail: gslee@lginnotek.com