

# 나노 윤활유를 이용한 압축기 스텝동부 재질의 경도에 따른 윤활특성 평가

한 영 철, 구 본 철, 이 광 호, 황 유 진, 이 재 근<sup>†</sup>  
부산대학교 기계공학과

## Lubrication Characteristics of Nano-oil with Different Surface Hardness of Sliding Members

Youngcheol Han, Boncheol Ku, Kwangho Lee, Yujin Hwang, Jaekeun Lee<sup>†</sup>  
*School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea*

**ABSTRACT:** In this study, lubrication characteristics of sliding members were compared with the change of the hardness of friction surfaces and the application of nano-oil. The materials of the specimens were gray cast iron (AISI 35, AISI 60) and nickel chromium molybdenum steel (AISI 4320). The Friction coefficients and the temperature variations of on the frictional surfaces were measured by disk-on-disk tribotester under the condition of fixed rotating speed. The friction surfaces were observed by scanning electron microscope (SEM). In the results, the friction coefficients of the disk surface were increased as hardness difference was increased. The friction coefficient lubricated in nano-oil was less than mineral oil. This is because a spherical nano particle plays a tiny ball bearing between the frictional surfaces, improved the lubrication characteristics.

**Key words:** Hardness(경도), Lubrication(윤활), Nano-oil(나노오일), Mineral oil(광유), Wear(마모)

### 기 호 설 명

- $B$  : 점도 계수
- $C$  : 점도 계수
- $H$  : 경도 [Hv]
- $k$  : 마모 계수 [ $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ]
- $L$  : 하중 [N]
- $S$  : 마찰 거리 [m]

$V$  : 마모량 [ $\text{mm}^3$ ]

### 그 리 스 문 자

$\eta$  : 동점도 [cSt]

### 1. 서 론

윤활은 제품의 신뢰성, 유지 보수, 성능, 내구성 등의 향상을 위한 근본적인 학문이기 때문에 기계류 및 장치의 마찰, 마모를 줄이기 위한 중요한 인자 중 하나이다. 최근에는 열전달 성능

<sup>†</sup> Corresponding author  
Tel.: +82-51-510-2455; fax: +82-51-582-6368  
E-mail address: jklee@pusan.ac.kr

및 윤활 특성을 향상시키는데 도움을 주는 나노 유체에 대한 관심이 점차 커지고 있다.

마모에 의한 기계 부품류의 손상은 재료의 손실뿐만 아니라 이로 인한 시간적인 손실을 가져오기 때문에 심각한 문제이다. 따라서 마모 특성에 영향을 끼치는 인자에 관한 이해가 무엇보다 중요하다. 습동부의 윤활에 관한 연구는 오래전부터 진행되었고, 습동부 재질의 경도가 마모 특성에 영향을 끼치는 주요 인자라는 것을 알 수 있었다. 경도가 마모에 중요한 인자라는 사실은 아래의 Archard 마모식<sup>(1)</sup>을 통해 알 수 있다.

$$V = kLS/H$$

많은 연구자들이 재료의 경도와 마모 특성의 관계에 관한 연구를 수행하였다. Hans et al.<sup>(2)</sup>은 steel/copper 합금을 이용해 재료의 경도가 윤활에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 재료의 경도가 증가할수록 마모량이 감소한다는 사실을 밝혔다. Axén et al.<sup>(3)</sup> 또한 three-body 연삭마모 조건에서 상대 시편의 경도가 마모에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였고, 경도가 높아질수록 마모율이 높아진다는 것을 알 수 있었다. Singhai<sup>(4)</sup>는 Pin-on-disk 마모 실험 장치를 이용하여 건식 윤활 상태에서 다양한 경도의 quenched - and - tempered steel을 이용하여 경도가 습동부의 마모에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 핀의 경도가 동일한 조건에서, 핀의 경도보다 낮은 경도의 링의 표면이 실험 후 표면의 거칠기 더욱 거칠어진다는 것을 밝혔고, 또한 마모율이 증가한다는 것을 알 수 있었다. Feyzullahoğlu et al.<sup>(5)</sup> 또한 오일 윤활 조건에서 베어링 재료의 윤활 상태를 알아보기 위해 마모 시험을 수행하였다. 실험 결과, 베어링 재료의 경도가 높은 재료일수록 경도가 낮은 재료에 비해 마모량이 적다는 것을 알 수 있었다. Prasad<sup>(6)</sup>는 Pin-on-disk tester를 이용하여 윤활 조건에 따른 비교 실험을 수행하였다. 건식 윤활, 오일 윤활, 그라파이트 입자를 포함한 오일윤활 조건에서의 미끄럼 마모에 대한 특성을 분석하였다. 실험 결과, 시편의 마찰계수는 그라파이트 입자를 포함한 오일 윤활 조건에서 가장 낮았고, 건식 윤활 조건에서 가장 높게 나타난다고 밝혔다.

본 연구의 목적은 냉동기유로 많이 사용되고 있는 광유 윤활 조건에서 서로 다른 경도를 가지는 습동부 사이의 윤활 특성을 파악하는 것에 있다. 또한 나노 입자를 분산시킨 나노 오일의 적용을 통해 나노 입자가 마찰 거동에 미치는 영향에 대해 알아보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 Disk-on-Disk Tribotester의 개념도<sup>(7)</sup>를 나타낸 것이다. 실험 장치는 크게 하중부, 마찰부, 구동부, 제어부로 구분되어진다. 주요 구성요소는 고정 디스크와 회전 디스크, 밀폐 챔버, 에어 실린더, 하중 로드셀, 마찰 로드셀, 히터, 서보 모터 등으로 구성되어 있다. 고정 디스크와 회전 디스크 사이를 일반적인 마찰 표면으로 간주하고, 디스크는 오일에 충분히 잠겨 있게 된다. 하중은 에어 실린더에 의해 조절된다. 회전 디스크의 회전 속도는 서보 모터 인버터를 통해 조절된다. 에어 실린더 아래에 있는 로드셀을 통해 하중의 크기를 측정하고, 밀폐 챔버 내부에 있는 또 다른 로드셀은 디스크의 회전과 하중에 따른 마찰력을 측정한다. 고정 디스크에 부착하는 열전대를 통해 마찰 표면의 온도를 측정한다. 실험이 진행되는 동안 하중, 마찰력, 마찰온도의 변화를 모니터링 하였고,

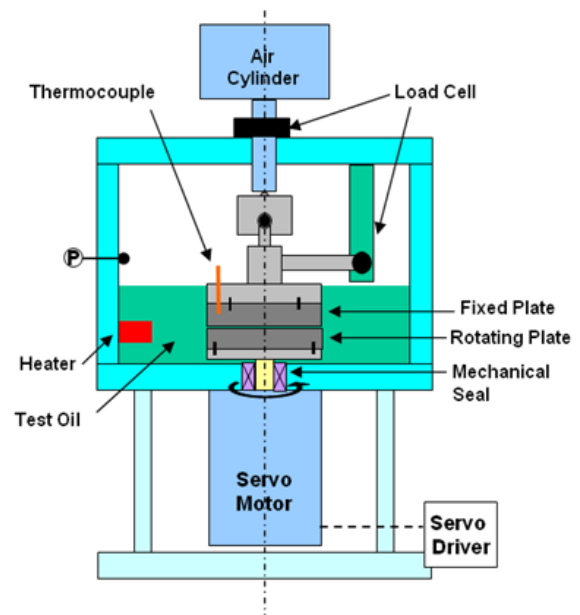


Fig.1 Schematic of disk-on-disk tribotester to evaluate lubrication characteristics.

Table 1 Major conditions of lubrication tests

Normal load (N)	100~1000
Rotating speed (rpm)	1000
Refrigerant oil	Mineral oil, Nano-oil
Nano particle	Carbon nano particle
Ambient temperature	26~28
Relative humidity	50~70

측정된 데이터는 데이터 획득 시스템을 통해 저장하였다.

Table 1은 본 연구의 실험 조건을 간단히 정리한 것이다. 모든 실험은 실험 전 하중 100 N, 회전 속도 500 rpm 조건에서 10분간 에이징을 하였다. 에이징 후, 회전 속도를 1000 rpm으로 고정된 상태에서 하중은 250 N에서 1000 N까지 20분 간격으로 250 N씩 단계적으로 상승시킨 후, 다시 단계적으로 250 N까지 감소시켰다. 오일은 광유와 광유에 나노 입자를 분산시킨 나노 오일을 사용하였다. 나노 오일은 나노 입자를 Sonic bath를 이용해 24시간 이상 분산시켰다. 윤활 특성을 Stribeck curve를 통해 해석하기 위해 광유와 나노 오일에 대해서 모세관 동점도계(Schott, Germany)를 이용하여 동점도를 측정하였다. 동점도 값은 40°C, 60°C, 80°C에서 측정하였고, 100°C에서의 값은 아래의 Walther equation<sup>(8)</sup>을 이용해 계산을 통해 얻을 수 있었다.

$$\text{Log}_{10}(\log_{10}(\eta + 0.7)) = B + C \log_{10}(273 + T)$$

Table 2는 실험에 사용된 디스크 재료와 재료의 경도를 나타낸 것이다. 디스크의 재료는 회주철과 니켈-크롬-몰리브덴강을 사용하였다. 경도 측정은 비커스 경도 측정기를 이용해 측정하였다. 회전 디스크의 경도는 630 Hv로 고정시키고, 고정 디스크의 경도를 3단계(100 Hv, 240 Hv, 630 Hv)로 가변하였다. 실험 후 마찰에 의한 디스크의 표면 분석을 위해 SEM(Scanning

Table 2 The hardness of the disk

Materials	Hardness(Hv)
AISI 35	100
AISI 60	240
AISI 4320	630

Electron Microscopy) 촬영을 실시하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 동점도 측정 결과

Fig. 2는 광유와 나노 오일에 대해 40°C, 60°C, 80°C에서 측정된 동점도 값 및 Walther equation을 이용해 계산된 100°C에서의 동점도 값을 나타낸 것이다. 동점도는 오일의 온도가 증가함에 따라 비선형적으로 감소한다는 것을 결과로부터 알 수 있다. 또한, 동일한 온도 조건에서 광유와 나노윤활유의 동점도 값은 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 따라서 나노 입자는 나노 오일의 동점도 값을 결정짓는데 영향을 끼치지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 본 연구의 동점도 측정 결과에서 알 수 있듯이 광유와 나노 오일의 온도에 따른 동점도 값이 거의 일치하기 때문에 윤활 특성을 비교 분석하여 해석하는 점에 있어서 오일의 동점도가 미치는 영향은 무시할 수 있다.

#### 3.2 마찰계수 측정 결과

Fig. 3은 광유와 나노 오일 윤활 조건에서 마찰 실험을 통해 측정된 하중에 따른 마찰계수 값을 나타낸 것으로 그림에 나타난 결과는 각 단계에서의 측정된 마찰계수 값에 대해 평균값으로 나타낸 것이다. Fig. 3의 결과에서 알 수 있듯이 마찰계수는 하중이 증가할수록 증가하고, 반대로

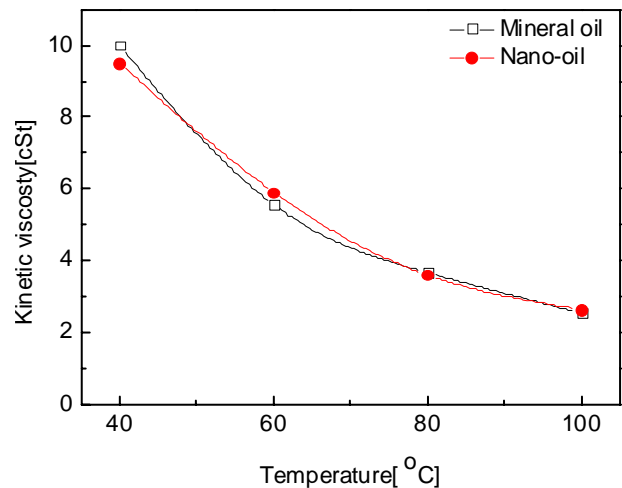


Fig. 2 Kinetic viscosity of mineral oil and nano-oil according to the temperature.

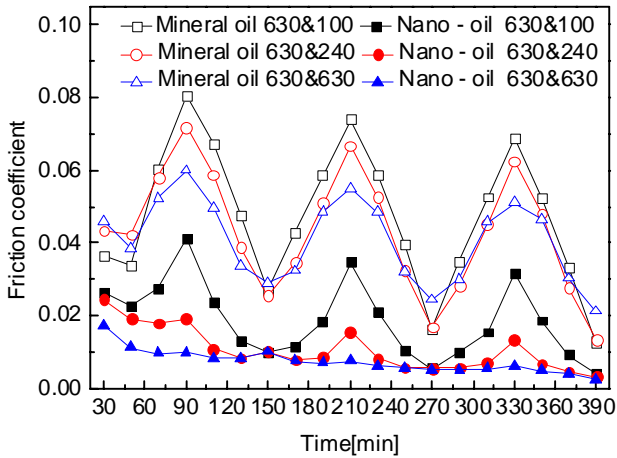


Fig. 3 Average friction coefficient according to change of the hardness of fixed disk during the lubrication tests (disks were lubricated in both mineral oil and nano-oil, the hardness of the rotating disk was fixed of 630 Hv).

하중이 감소할수록 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 광유 윤활 조건과 나노 오일 윤활 조건을 비교해 볼 때, 동일한 조건에서 나노 오일 윤활 조건에서의 마찰계수가 광유 윤활 조건의 마찰계수 값보다 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 원인은 나노 입자가 고정 디스크와 회전 디스크 사이에서 블베어링 역할을 하여 두 디스크 표면의 직접적인 접촉을 막아줌으로써 마찰계수가 낮아졌다고 볼 수 있다. Rapoport et al.<sup>(9)</sup>는 나노 입자가 마찰 표면에서 작용시키는 현상에 대한 메커니즘에 대해 연구하였다. 그는 연구를 통해 구형의 나노 입자는 마찰 시편 사이에서 구름효과(rolling effect)를 통해 마모 저감에 효과적인 역할을 한다고 밝혔다.

한편, 두 디스크의 경도차에 따른 마찰계수의 변화를 살펴보면, 광유 윤활 조건에서 고정 디스크와 회전 디스크 사이의 경도차가 클수록 마찰계수가 크게 나타나고, 고정 디스크와 회전 디스크의 경도가 같을 때 마찰계수가 가장 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 경도의 변화에 따른 마찰계수의 변화는 나노 오일 윤활 조건에서도 같은 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서 마찰계수는 나노 오일 윤활 조건에서 고정 디스크와 회전 디스크의 경도가 동일한 경우 가장 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다.

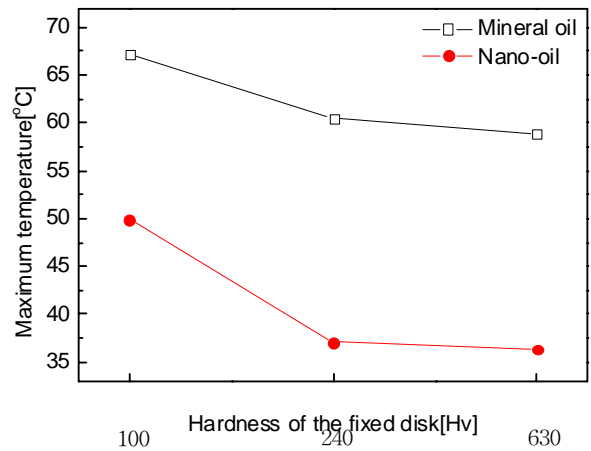


Fig. 4 Maximum temperature according to change of the hardness of the fixed disk during the lubrication tests (measured at the normal force of 1000 N in both mineral oil and nano-oil, the hardness of the rotating disk was fixed of 630 Hv)

### 3.3 마찰 표면 온도 측정 결과

Fig. 4는 디스크의 경도차에 따른 마찰 표면에서의 최대 온도를 나타낸 것이다. 측정된 마찰 표면의 최대 온도는 광유, 나노 오일 윤활 조건에서 하중이 1000N 일 때 마찰 표면에서 측정된 온도의 평균값을 나타낸 것이다. 실험 결과, 고정 디스크와 회전 디스크 사이의 마찰에 의한 디스크 표면의 최대 온도는 고정 디스크와 회전 디스크 재료의 경도차가 클수록 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 두 디스크 사이의 경도차가 클수록 마찰 표면의 온도가 높은 것은 디스크 사이의 마찰이 상대적으로 많이 일어났기 때문이다. 즉 상대적으로 경도가 낮은 재료의 표면이 경도가 높은 재료의 표면과 마찰이 일어나는 정도가 심해진다고 할 수 있다.

또한, 나노 오일 윤활 조건에서의 마찰 표면 최대 온도가 광유 윤활 조건보다 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 마찰계수 측정 결과와 마찬가지로, 구형의 나노 입자가 마찰 표면 사이에서 윤활 성능을 향상시키는데 효과적이라는 것을 의미한다.

### 3.4 마찰 표면 분석 결과

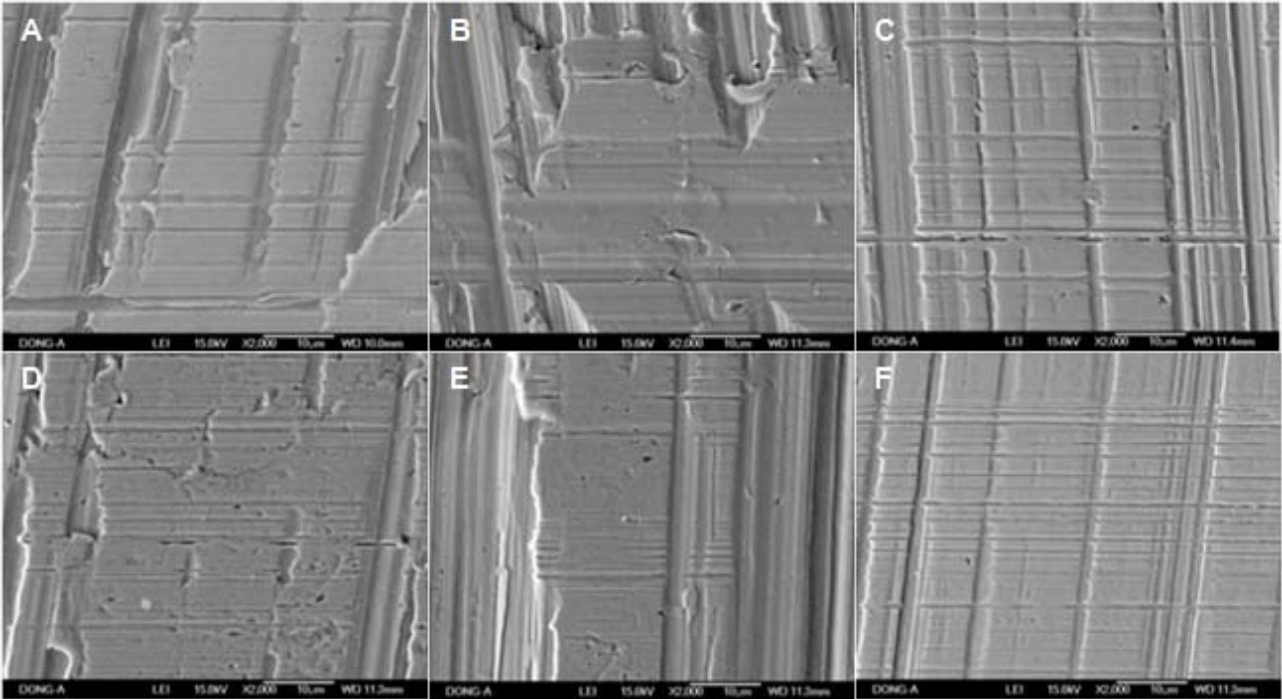


Fig. 5 SEM images of the sliding contact surface of the fixed disk after tests (magnification: 2000 times). The hardness of the rotating disk is 630 Hv; the hardness of the fixed disk is 100(A, D), 240(B, E), and 630 Hv(C, F), respectively and immersed in both mineral oil (A, B and C) and nano-oil (D, E and F).

Fig. 5는 실험 후 고정 디스크의 마찰 표면을 관찰하기 위한 수행한 SEM 촬영 이미지를 나타내고 있다. 그림 5의 (A), (B), (C)는 광유 윤활 조건, (D), (E), (F)는 나노 오일 윤활 조건에서 실험 후 고정 디스크의 마찰 표면을 촬영한 것이다. 나노 오일 윤활 조건에서 광유 윤활 조건에 비해 마찰계수가 저감되는 현상은 마찰 표면의 관찰을 통해 확인할 수 있다. 광유 윤활 조건에서, 고정 디스크와 회전 디스크 사이의 경도차가 큰 (A)의 경우 디스크 가공에 의해 생성되었던 그루브(groove)가 연삭마모 의해 부드러워진 것을 볼 수 있다. 또한 응착마모에 의해 디스크 표면의 일부가 떨어져 나간 흔적을 볼 수 있다. 디스크 사이의 경도차가 (A)에 비해 작은 (B)의 경우는 연삭마모의 흔적을 볼 수 있지만 응착마모의 흔적은 거의 볼 수 없다. 두 디스크의 경도차가 없는 (C)의 경우 가공에 의해 생성된 그루브가 (A)와 (B)에 비해 많이 보이는 것을 알 수 있고, 응착마모의 흔적은 볼 수 없음을 알 수 있다. 즉 경도차가 클수록 마모가 많이 나타나는 것을 알 수 있다.

나노 오일 윤활 조건에서 고정 디스크 경도의 변화에 따른 마찰 표면의 형상은 광유 윤활 조건에서와 유사하게 나타난다. 두 디스크 사이의 경도차가 없는 (F)의 경우 광유 윤활 조건의 (C)에 비해 디스크 표면 가공에 의한 그루브 형상이 좀 더 많이 보이는 것을 알 수 있는데 이것은 나노 오일의 마찰계수 및 마찰표면 온도 저감 효과 현상과 동일하게 설명될 수 있다.

### 3.5 윤활 영역 해석

광유 및 나노 오일 윤활 조건에서 두 디스크 사이의 윤활 특성을 stribek curve를 통해 분석해 보았다. 마찰계수는 윤활유의 점도( $\eta$ ), 디스크의 회전 속도( $N$ )에 비례하고, 하중( $P$ )에 반비례한다. Fig. 6은 광유, 나노 오일 윤활 조건에서의 마찰 실험을 통해 얻은 stribek curve를 나타낸다. 광유 윤활 조건에서, 디스크에 가해지는 하중이 낮은 영역에서는 유체윤활 영역에서 마찰 거동이 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 하중이 증가함에 따라 윤활 영역이 유체윤활 영역에서

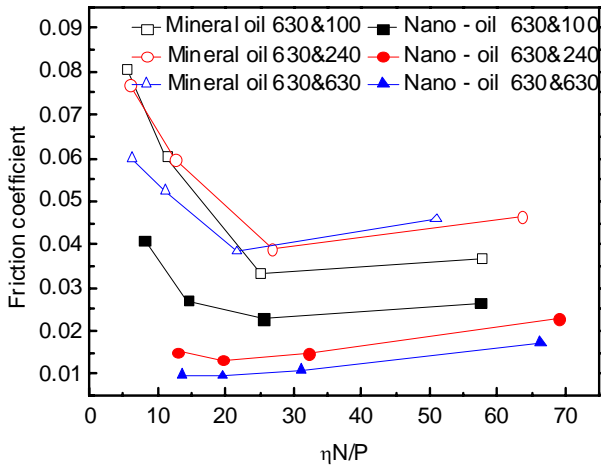


Fig. 6 Stribeck curves according to lubrication tests in mineral oil and nano-oil.

혼합윤활 영역으로 넘어가는 것을 알 수 있다.

반면에, 나노 오일 윤활조건에서도 고정 디스크와 회전 디스크 사이의 경도차가 큰 경우에는 하중의 증가에 따라 윤활영역이 유체윤활 영역에서 혼합윤활 영역으로 넘어갔지만, 두 디스크 사이의 경도차가 작은 실험 조건에서는 하중이 증가하더라도 윤활영역은 유체윤활 영역에서만 마찰 거동이 나타났다. 두 디스크의 경도가 동일한 조건에서의 마찰계수는 광유 윤활 조건에 비해 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 나노 입자가 디스크 표면 사이에서 마찰을 줄여주는 역할을 통해 윤활 특성을 향상시킨다는 것을 알 수 있다. 윤활 특성은 나노 오일 윤활 조건에서 시편 사이의 경도차가 적을수록 좋게 나타나는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해 상대 디스크의 경도 변화에 따른 윤활 특성이 어떻게 변화하는지를 광유 윤활 조건에서 살펴보고, 나노 오일 윤활 조건에서 마찰 특성이 어떻게 변화하는지를 살펴보았다.

(1) 광유 윤활 조건에서 습동부 재질 사이의 경도차가 작을수록 윤활 특성이 우수하다.

(2) 나노 오일 윤활 조건에서 나노 입자가 습동부 재질 표면간의 직접적인 마찰을 줄여주기 때문에 윤활 성능을 향상시킨다.

#### 참고 문헌

1. Archard, J.F., 1953, Journal of Applied Physics, Vol. 24, pp. 981-988.
2. Krause, H., and Tackenberg, W., 1980, The influence of hardness difference on the frictional and wear behaviour of steel/copper alloy pairs in plane sliding friction under mixed friction conditions, Wear, Vol. 64, No. 2, pp. 291-302.
3. Axén, N., and Jacobson, S., Hogmark, S., 1994, Influence of hardness of the counterbody in three-body abrasive wear - an overlooked hardness effect, Tribology International, Vol. 27, No. 4, pp. 233-241.
4. Bian, S., Maj, S., Borland, D.W., 1993, The unlubricated sliding wear of steels: The role of the hardness of the friction pair, Wear, Vol. 166, No. 1, pp. 1-5.
5. Feyzullahoğlu, E., Zeren, A., Zeren, M., 2008, Tribological behaviour of tin-based materials and brass in oil lubricated conditions, Materials & Design, Vol. 29, No. 3, pp. 714-720.
6. Prasad, B.K., 2007, Investigation into sliding wear performance of zinc-based alloy reinforced with SiC particles in dry and lubricated conditions, Wear, Vol. 262, No. 3-4, pp. 262-273.
7. Lee, J.K., Cho, S.W., Hwang, Y.J., Lee, C.G., Kim, S.H., 2007, Enhancement of lubrication properties of nano-oil by controlling the amount of fullerene nanoparticle additive, Tribology Letter, Vol. 28, No. 2, pp. 203-208.
8. Sánchez-Rubio, M., Chinas-Castillo, F., Ruiz-Aquino, F., Lara-Romero, J., 2006, A new focus on the Walther equation for lubricant viscosity determination, Lubrication Science, Vol. 18, No. 2, pp. 95-108.
9. Rapoport, L., Leshchinsky, L., Lvovsky, M., Nepomnyashchy, O., Volovik, Yu., Tenne, R., 2002, Mechanism of friction of fullerenes, Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 54, No. 4, pp. 171-176.