

그라파이트 나노윤활유의 열화 후 윤활 특성 비교 연구

이창건 · 황유진 · 최영민 · 박민찬 · 이재근* · 최철* · 오제명*

부산대학교 기계공학부, *한전전력연구원 전력소재그룹

Comparative Study to the Tribological Characteristics of Graphite Nano Lubricants after Thermal Degradation

Changgun Lee, Yujin Hwang, Youngmin Choi, Minchan Park,
Jaekeun Lee[†], Cheol Choi* and Jemyung Oh*

School of Mechanical Engineering, Pusan National University

*Advanced Materials Research Group, Korea Electric Power Research Institute

(Received April 18, 2008; Revised June 23, 2008; Accepted July 5, 2008)

Abstract – Many researchers have tried to improve the tribological characteristics of lubricant by adding various nano particles in the base lubricant. But the reliability evaluation of the lubricants are rarely performed in its real operation condition. In this study, the physical property and the tribological characteristics of the graphite nano lubricant were evaluated and compared with raw lubricant after thermal degrading. In order to evaluate the tribological characteristics, the disk-on-disk tribotester was adopted to measure the friction coefficient of the graphite nano lubricants. Also the temperature variations of friction surfaces were measured by the thermocouple installed on the fixed plate in the test chamber of the tribotester. The kinematic viscosity was measured using a capillary viscometer on the temperatures of 40, 60 and 80°C. The results showed that the graphite nano lubricant had lower friction coefficient and less wear on the friction surfaces than raw lubricant. After thermally degrading, the friction coefficients of graphite nano lubricant increased, but the friction coefficients after thermal degradation were still maintained lower than those of raw lubricant.

Key words – disk-on-disk triboteter, friction coefficient(마찰계수), graphite nano lubricant(그라파이트 나노 윤활유), kinematic viscosity(동점도), thermal degradation(열화)

1. 서 론

윤활은 인류 문명에서 가장 오래되고 유용한 기술들 중 하나로 역사 문헌을 통해 그 기원을 살펴볼 경우, 이집트의 피라미드 건축 시기까지 거슬러 갈 수 있다. 이러한 윤활 기술은 19세기의 산업혁명을 통한 기계 기술의 발달과 함께 더 윤활 특성을 향상하기 위한 더 많은 연구가 이루어졌다[1]. 다양한 접촉 형태를 보이며 상대운동을 하는 다양한 종류의 기기들은 마찰과 마멸을 감소시키기 위하여 그 특성에 따른 다양한 종류의 윤활유를 요구하였으며, 이에 따라 많은 연구자들이

일반적인 윤활유의 윤활 특성을 개선하여 그 필요에 부합하는 윤활유를 만들기 위해 노력하였다. 이러한 시도 중 한 가지 방법이 윤활유에 첨가제를 넣는 것으로, 이러한 방법은 윤활 공학에 광범위하게 적용되어, 윤활 특성을 향상시키는데 큰 공헌을 해왔다.

나노기술(Nano Technology)은 20세기 말부터 각광받기 시작한 혁신적인 기술적 개념의 전환으로서 많은 분야에서 새로운 가능성을 보여주고 있다. 최근 수 년 동안 나노 크기의 입자들은 그 크기와 비표면적 그리고 입자 크기가 작아졌을 때 가지는 특별한 물성으로 인해 첨가제의 새로운 선택으로 급부상했다[2].

현재 다양한 나노 입자를 이용한 나노 윤활유에 대한 많은 연구들은 지속적으로 이루어지고 있으며 많은

[†]주저자 · 책임저자 : jklee@pusan.ac.kr

연구자들이 나노 윤활유가 마멸과 마찰을 감소시키는 데 효과적이라는 연구 결과를 발표하고 있다[3-8]. 그들은 폴리머, 금속, 유/무기 재료 등을 사용하여 다양한 종류의 입자를 제조하고 적용하여 그 윤활 특성들을 평가했으며, 그러한 연구를 통해 나노 윤활의 메커니즘을 정립하기 위한 노력을 기울이고 있다. 현재까지는 나노 윤활의 메커니즘에 대한 정립된 이론은 없지만, 그들은 Mending Effect, Rolling Effect, Ball Bearing Effect, Colloidal Effect, Protective Film Effect, Third Body Effect 등을 통해 그 메커니즘을 설명하고 규명하려고 노력하고 있다.

지금까지 진행되고 있는 연구는 그 가능성과 응용성에 초점을 두고 있는 반면, 실제적인 응용에 있어서 신뢰성에 대한 평가는 전혀 이루어지지 않고 있는 실정이다. 본 연구에서는 그래파이트 나노 입자를 이용하여 나노 윤활유를 제조하고 입자 첨가 유무에 따른 윤활 특성을 비교하였다. 또한 고온 조건에서의 열화 시험을 거친 후, 열화 후 나노 윤활유의 윤활 특성이 어떻게 변하는지 관찰하였다.

2. 실험

2-1. 그래파이트 나노 윤활유 제조

본 연구에서 사용된 기본 윤활유는 상용으로 시판되고 있는 광유(Supergear EP220, SK, Korea)로 40°C에서 220 cSt의 점도를 가지며, 그 상세한 물성치는 Table 1에 정리되었다. 나노 입자는 고체 윤활제로서 사용되는 Graphite 입자(Nanostructured & Amorphous Materials, Inc.)를 선정하였으며 상세한 물성치는 Table 2에 정리되었다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 Graphite 나노 입자의 TEM(Transmission Electron Microscope) 사진이다. 윤활유에 첨가한 나노 입자의 농도는 0.1 vol%로 고정하였으며, Alkylaryl Sulfonate 계열의 분산제를 사용하여 나노 윤활유의 분산안정성을 확보하였다. 상온 조건에서 기본 윤활유와 나노 입자, 분산제를 혼합한 후, Ultrasonic Homogenizer를 이용하여 2시간을 분산시켰다. 분산제는 나노 입자 표면의 특성을 개질하여 윤활유 내에서 입자의 분산성을 향상시킨다. 열화(Thermal Degradation)[9]는 일반적으로 윤활유에 가혹한 조건을 인가하여 그 물리적, 화학적 특성을 저감시키는 것으로 본 실험에서는 기본 윤활유의 사용 온도 범위보다 높은 온도인 150°C에서 2주간 방치시켰다.

Table 1. Typical properties of raw lubricant

Properties	Supergear EP220
Specific Gravity	0.89
Kinematic Viscosity (@40°C)	219.5 cSt
Kinematic Viscosity (@100°C)	18.9 cSt
Viscosity Index	96
Acid Number	0 mgKOH/g
Boiling Pont	250°C

Table 2. Typical properties of graphite particle

Properties	Graphite
APS	55 nm
SSA	~120 m ² /g
Morphology	Spherical
Bulk Density	~0.26 g/cm ³
True Density	2.26 g/cm ³

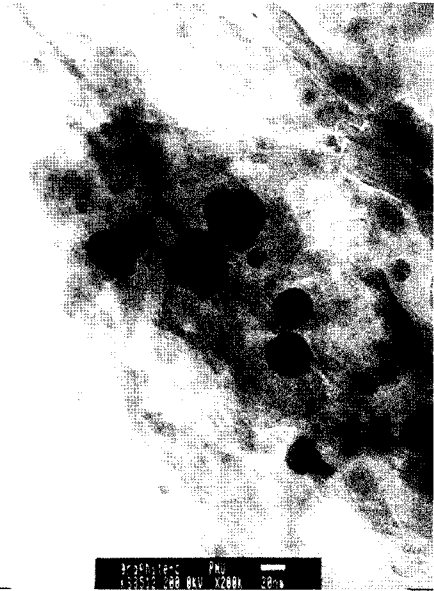


Fig. 1. TEM image of graphite nanoparticles.

2-2. 마찰계수

마찰계수는 윤활유의 윤활 특성을 평가하기 위한 중요한 요소이다. 본 연구에서는 Siebel과 Kehl[8]이 제안한 Disk-on-disk Tribotester를 제작하여 윤활유의 마찰계수를 측정하였다. 많은 연구자들이 윤활 특성을 평가하기 위하여 Disk-on-disk type tester를 사용해왔다. 본 실험 장치의 상세한 설명과 운전 조건에 대한 것은

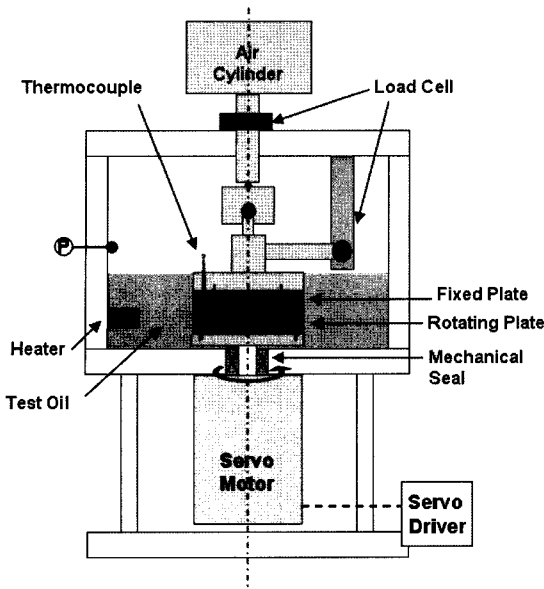


Fig. 2. Schematics of the disk-on-disk tribotester for measuring the tribological characteristics of nano lubricants.

선행연구에 잘 설명되어 있다[10-12].

Fig. 2는 연구를 위해 설계, 제작된 Disk-on-disk Tribotester의 장치의 기본적인 구성을 보여준다. 이 장치는 크게 마찰 면에 수직 하중을 인가하는 Air Cylinder와 수직 하중과 마찰력을 측정하는 두 개의 Load Cell 그리고 마찰 면에 회전 운동을 인가하는 Servo Motor로 구성되며, 마찰 현상이 발생하는 주요한 부분인 Fixed Plate와 Rotating Plate는 윤활유 내에 잠겨 운전된다. 수직 하중은 Air Cylinder 시스템에 의하여 인가되며 그 최대 인가 범위는 5,000 N이며, 마찰 면에 가해지는 회전 운동은 Servo Motor에 의해 제어되고 최대 회전수는 3,000 rpm이다. 마찰 면에 작용하는 수직 하중의 크기는 Air Cylinder 아래에 설치된 Load cell에 의하여 측정되며, 마찰력은 Chamber 내에 설치된 다른 Load Cell에서 측정을 한다. Fig. 3은 Ring 형태의 두 Plates에 대한 형상을 보여준다. 시편의 재료는 GC200(KS)로 그 표면은 중심선 평균 거칠기 $R_a=0.2 \mu\text{m}$ 의 표면 거칠기를 가지도록 가공되었다. Table 3는 본 연구에서 수행된 실험의 주요 조건들을 정리한 것이다.

윤활 평가는 35°C에서 시작하며 100 N의 하중과 500 rpm의 회전수에서 10분 동안 길들임 시간을 가진다. 길들임을 거치면 윤활유의 온도는 대략 40°C까지

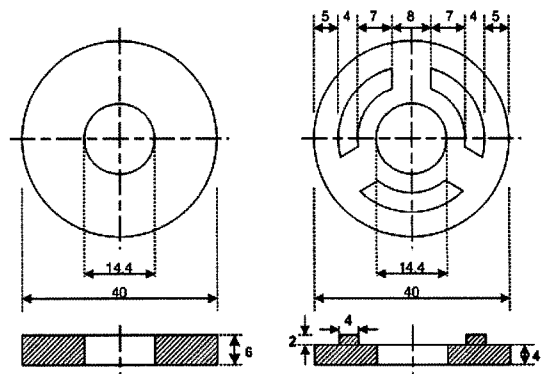


Fig. 3. Size and shape of the fixed and rotating plates in the disk-on-disk tribotester.

Table 3. Test conditions of lubrication evaluation

Tester	Disk-on-disk Tribotester
Initial running-in	100 N, 500 rpm, 10 min.
Rotation Speed	1,000 rpm (0.68 m/sec)
Normal Force	~3,000 N
Starting Temperature	35°C
Material of plates	GC 200 (KS)
Base Lubricant	SK Supergear EP 220
Particle	Graphite (55 nm)
Particle Concentration	0.1 vol%
Dispersant	Alkylaryl Sulfonate
Thermal Degradation	2 weeks, 150°C

상승하며 그 후, 1,000 rpm에 회전수를 고정시킨 후, 500 N부터 3,000 N까지 수직 하중을 step 함수로 증가시키며 마찰계수를 측정한다.

2-3. 동점도와 Stribeck Curve

동점도는 윤활유의 특성을 결정하는 주요한 물성치로써 온도 변화에 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 Capillary Viscometer(ViscoClock, Ubbelohde)를 이용하여 나노 윤활유의 동점도를 측정하였으며, 온도에 따른 관계를 확인하기 위하여 40°C에서 100°C까지 20°C 간격으로 동점도를 측정하였다.

윤활과 관련된 마찰 거동은 Stribeck Curve에 의해 분석될 수 있으며, 윤활 영역을 구별하고 윤활 특성을 파악하는데 큰 도움을 준다. 본 연구에서는 마찰계수와 동점도, 수직하중과 회전속도를 고려하여 본 연구에 사용된 나노 윤활유에 대한 Stribeck Curve를 제시한다.

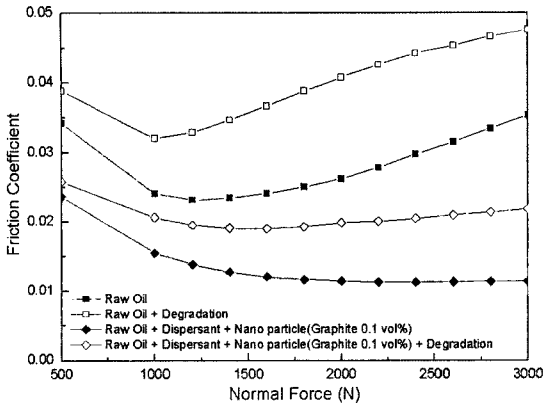


Fig. 4. Friction coefficients of raw lubricant and nano lubricant as a function of normal force before and after thermal degradation.

3. 결 과

3-1. 마찰계수와 온도

기본 윤활유와 나노 윤활유의 열화 유무에 따른 마찰계수를 측정하였다. 500 N부터 3,000 N까지 하중을 증가시켰으며, 각 하중 조건에 대하여 10분 씩 지속하였다. Fig. 4는 각 윤활유에 대한 마찰계수 실험 결과를 나타낸 것이다. 기본 윤활유와 나노 윤활유의 마찰계수를 비교할 경우, 나노 입자 첨가에 의한 마찰계수가 3,000 N에서 70% 이상 감소되는 것을 확인할 수 있으며 수직 하중이 작아질수록 마찰계수의 저감 효과는 줄어든다. 열화 과정을 거친 기본 윤활유와 나노 윤활유의 윤활 특성은 감소하여 마찰계수가 전 하중 영역에 걸쳐서 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 동일한 열화 과정을 거치더라도 나노 윤활유의 마찰계수가 기본 윤활유에 비하여 3000 N의 수직 하중 조건에서 50% 정도 낮은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 두 마찰 면인 Fixed Plate와 Rotating Plate 사이의 온도를 측정된 것으로 윤활 특성 평가가 수행된 각 윤활유에 대하여 하중 조건별로 그 온도 변화를 나타낸 것이다. 윤활유 적용에 따른 마찰 면에서의 마찰 감소로 인해 마찰열 발생이 현저히 감소하였으며, 이에 따라 마찰면의 온도도 감소하게 된다. 마찰면의 온도 또한 마찰계수의 경우와 동일하게 마찰계수가 낮은 경우 평균 온도가 낮으며 마찰계수가 높을 경우 높은 온도 값을 가진다. 3,000 N의 수직 하중 조건에서 온도를 비교해 볼 경우, 나노 윤활유를 적용함에 따라 온도가 50°C 이상 감소하는 것을 확인할 수 있

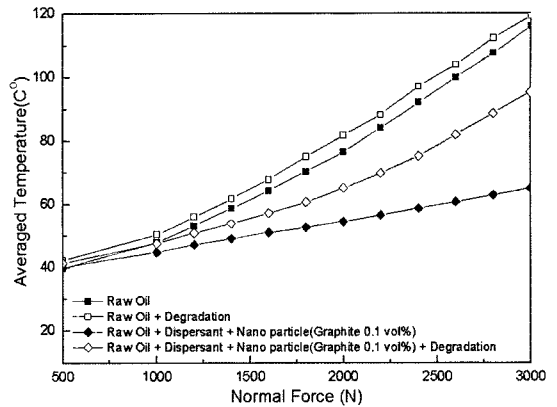


Fig. 5. Temperature variation of raw lubricant and nano lubricant as a function of normal force before and after thermal degradation.

으며, 열화 과정을 거치더라도 온도가 20°C 정도 감소한다.

3-2. 동점도와 Stribeck Curve

유체의 유동성의 정도를 나타내는 동점도는 온도 조건에 따라 큰 영향을 받으며 저온 영역에서 높은 동점도 값을 보이는데 비하여 온도가 증가할수록 동점도가 감소한다. 동점도 값이 낮을 수록 흐름성은 우수하나 극압 특성이 저하된다. Fig. 6은 40°C에서 100°C 사이에서 기본 윤활유와 나노 윤활유의 동점도 측정값을 보여주고 있다. 60°C 이하의 낮은 온도 영역에서는 나노 윤활유의 동점도가 기본 윤활유에 비하여 5 cSt 정도 낮은 값을 보인다. 이는 분산제 첨가에 따른 점도

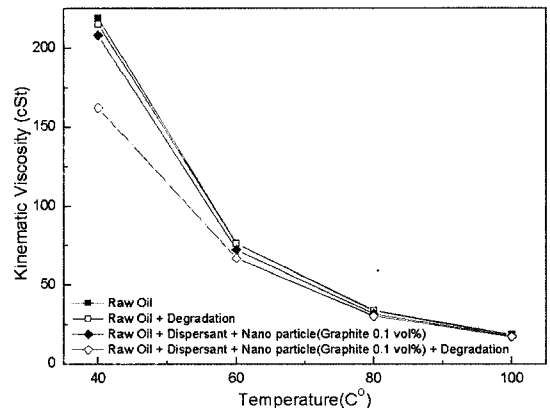


Fig. 6. Kinematic viscosity of raw lubricant and nano lubricant as a function of normal force before and after thermal degradation.

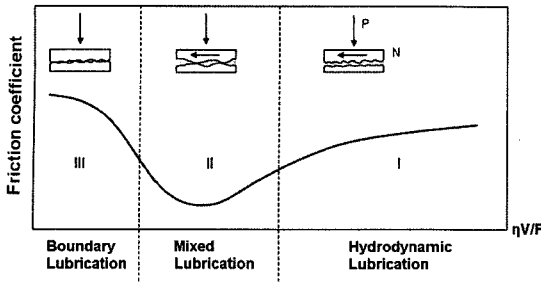


Fig. 7. Stribeck curve and regimes of lubrication¹⁴ (i.e. η : Kinematic Viscosity, P: Normal Force and N: Rotation speed).

감소로 열화 과정을 거칠 경우, 동점도는 40°C 조건에서 40 cSt 정도 감소한다. 하지만 이러한 차이는 온도가 증가함에 따라 줄어들며 80°C 온도 조건에서는 10% 감소, 100°C 조건에서는 5% 정도의 감소를 보인다.

Stribeck Curve[13]는 윤활 상태와 마찰계수의 관계를 표현한 곡선으로 마찰 면에 작용하는 수직하중(P)과 회전수(N), 동점도(η)의 조합인 $\eta N/P$ 와 마찰계수와 관계가 통해 각 운전 조건 하에서 마찰면의 윤활 조건을 판단할 수 있다. Fig. 7과 같은 형태를 가지는 Stribeck Curve는 크게 유체, 혼합, 경계 윤활 영역으로 구분되는데, 혼합 윤활 영역(i.e. Regime II)은 마찰계수가 가장 낮은 영역 근방에 해당하며 마찰면 표면이 간헐적으로 접촉하면서 유체윤활이 혼재한 상태이며, 유체 윤활 영역(i.e. Regime III)은 두 마찰면이 윤활제에 의하여 완전히 분리되고 마찰면에 작용하는 하중은 유막에 의하여 지지되는 상태로 Stribeck Curve의 $\eta N/P$ 가 증가함에 따라 마찰계수가 증가하는 영역이고, 경계 윤활 영역(i.e. Regime I)은 유막이 파괴되어 운동 중에 접촉면이 심한 마찰을 일으키며 그 마찰계수는 급격히 증가한다.

Fig. 8은 본 연구에서 측정된 마찰계수와 동점도, 그리고 운전 조건을 바탕으로 기본 윤활유와 나노 윤활유에 대해 Stribeck Curve를 표현한 것이다. 전체적으로 기본 윤활유에 비하여 나노 윤활유의 마찰계수가 감소하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있고, 그 경향은 열화 시험을 거쳐도 그대로 유지된다. 기본 윤활유의 경우 $\eta N/P=100$ 근처에서 혼합 윤활 영역이 형성되는 반면, 그라파이트 나노 입자를 첨가한 나노 윤활유의 경우 $\eta N/P=30$ 이하에서 혼합 윤활 영역이 형성된다. 열화 과정을 거친 후, 기본 윤활유는 $\eta N/P=130$ 근방에서 혼합 윤활영역이 형성되는 반면, 나노 윤활유는 $\eta N/P=50$ 근방에서 혼합 윤활 영역이 형성

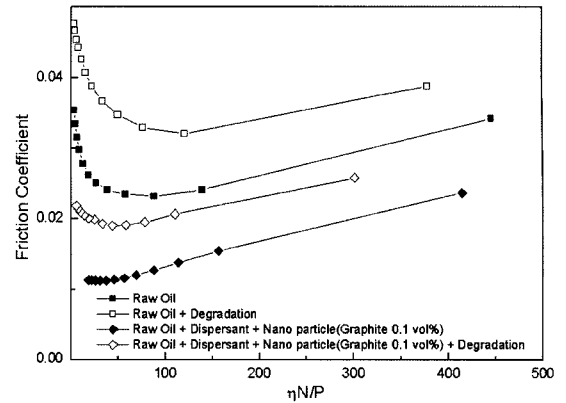


Fig. 8. Stribeck curves for the lubricants tested.

된다.

나노 윤활유가 기본 윤활유에 비하여 $\eta N/P$ 이 더 낮은 값에서 혼합 윤활 영역이 형성된다는 것은 나노 윤활유의 윤활 특성이 향상되어 더 높은 하중 조건에 대해서도 유막이 파괴되지 않고 그 하중을 지지할 수 있는 상태로 변했다는 것을 의미하여 이는 극압(Extreme Pressure)의 향상을 의미한다. 이러한 경향은 열화 과정을 거친 나노 윤활유에서도 동일하게 나타난다.

4. 결 론

본 연구에서는 산업용 기어유를 이용하여 나노 윤활유를 제작하고 열화 과정을 거친 전후의 윤활 특성을 비교 평가하였다. 각 윤활유에 대한 윤활 특성을 파악하기 위하여 Disk-on-disk Tribotester를 이용하여 다양한 하중 조건에서의 마찰계수 및 마찰표면의 온도를 측정하였으며, 각 윤활유에 대하여 온도별 동점도를 측정하였다. 이러한 결과를 바탕으로 마찰특성에 따른 윤활 영역을 보여주는 Stribeck Curve를 통해 윤활 특성을 비교하였다.

그라파이트 나노 윤활유가 기본 윤활유에 비하여 윤활 특성이 우수하며, 하중 3,000 N과 회전수 1,000 rpm 조건에서 70% 이상의 마찰 감소 효과를 보이며, 열화 과정을 거치더라도 그라파이트 나노 윤활유가 기본 윤활유에 비하여 50% 정도의 마찰계수가 낮은 것을 확인할 수 있다.

열화 과정을 거칠 경우, 기본 윤활유는 하중 조건에 따라 13~33% 정도의 마찰계수 증가를 보이는 반면, 나노 윤활유는 9~90%까지 마찰계수가 증가하여 나노 윤활유의 물성 변화가 더 크게 나타나지만, 열화 후

나노 윤활유의 마찰계수가 기본 윤활유에 비해 16~38% 정도 낮다.

Stribeck Curve를 통해 그 윤활 영역을 비교해 볼 경우, 기본 윤활유에 비하여 나노 윤활유의 최저 마찰계수는 낮으며, 유체윤활영역이 확장되어 극압성이 더 커지는 것을 확인할 수 있고 이는 열화 과정을 거친 윤활유에서도 마찰계수는 증가하지만, 극압이 더 높아진 것을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국전력(KEPCO)의 전력산업기반조성사업(ETEP)(Project No.312)의 재정적 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Hsu, S. M., "Nano-lubrication: Concept and Design", *Tribology International*, Vol. 37, pp. 537-545, 2004.
2. Xue, Q., Liu, W. and Zhang, Z., "Friction and Wear Properties of a Surface-modified TiO₂ Nanoparticle as an Additive in Liquid Paraffin", *Wear*, Vol. 213, pp. 29-32, 1997.
3. Liu, G., Li, X., Qin, B., Xing, D., Guo, Y. and Fan, R., "Investigation of the Mending Effect and Mechanism of Copper Nano-particles on a Tribologically Stressed Surface", *Tribology Letters*, Vol. 17, No. 4, pp. 961-966, 2004.
4. Tao, X., Jiazheng, Z. and Kang, X., "The Ball-bearing Effect of Diamond Nano Particles as an Oil Additive", *Journal of Physics*, Vol. D26, pp. 2932-2937, 1996.
5. Chinas-Castillo, F. and Spikes, H., "Mechanism of Action of Colloidal Solid Dispersions", *Transactions of the ASME*, Vol. 125, pp. 552-557, 2003.
6. Qiu, S., Dong, J. and Chen, G., "Tribological Properties of CeF₃ Nanoparticles as Additives in Lubrication Oils", *Wear*, Vol. 230, pp. 35-38, 1999.
7. Rapoport, L., Leshchinsky, V., Lvovsky, M., Nepomneyashchy, O., Volovik, Y. and Tenne, R., "Mechanism of Friction of Fullerene", *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 54, No. 4, pp. 171-176, 2002.
8. 안효석, 이성철, "첨가제에 함유된 미세한 구리합금 입자의 마찰 및 마모 특성", *한국윤활학회지*, 제 12권, 제 2호, pp. 32-40, 1996.
9. 김중수, 민병순, 이두순, 오대윤 최재권, "엔진 오일 열화와 피스톤 온도가 카본 디포짓 형성에 미치는 영향 Part II-디젤 엔진의 디포짓 형성 특성", *한국윤활학회지*, 제 14권, 제 2호, pp. 108-113, 1998.
10. Lee, S., Kim, S. and Hong, Y., "Application of the Duplex TiN Coatings to Improve the Tribological Properties of Electro Hydrostatic Actuator Pump Parts", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 193, pp. 266-271, 2005.
11. Lin, J., Shih, M. and Chen, Y., "The Tribological Performance of 6061 Aluminum Alloy/graphite Composite Materials in Oil Lubrications with EP Additives", *Wear*, Vol. 198, pp. 58-70, 1996.
12. Lee, J., Cho, S., Hwang, Y., Lee, C. and Kim, S., "Enhancing of Lubrication Properties of Nano-oil by Controlling the Amount of Fullerene Nanoparticle Additives", *Tribology Letters*, Vol. 28, pp. 203-208, 2007.
13. Luengo, G., Israelachvili, J. and Granick, S., "Generalized Effects in Confined Fluids: New Friction Map for Boundary Lubrication", *Wear*, Vol. 200, pp. 328-335, 1996.
14. 조용주, "마멸공학", 부산대학교 고장분석 및 신뢰성 연구센터, pp. 153, 2003.