

나노 윤활유를 이용한 스크롤 압축기 스러스트 베어링의 윤활특성 평가

Performance Evaluation of Nano-Lubricants at Thrust Slide-Bearing of Scroll Compressor

조한종¹, 조용일¹, 조상원², 이재근², 박민찬², 김대진², 이광호^{2,✉}
Han Jong Cho¹, Yong Il Cho¹, Sang Won Cho², Jae Keun Lee², Min Chan Park², Dae Jin Kim²
and Kwang Ho Lee^{2,✉}

¹ LG 전자(주) (Digital Appliance Research Laboratory, LG Electronics Inc.)

² 부산대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: cheeky81@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-3868

Manuscript received: 2011.7.6 / Revised: 2011.8.24 / Accepted: 2011.9.30

This paper presents the friction and anti-wear characteristics of nano-oil with a mixture of a refrigerant oil and carbon nano-particles in the thrust slide-bearing of scroll compressors. Frictional loss in the thrust slide-bearing occupies a large part of total mechanical loss in scroll compressors. The characteristics of friction and anti-wear using nano-oil is evaluated using the thrust bearing experimental apparatus for measuring friction surface temperature and the coefficient of friction at the thrust slide-bearing as a function of normal loads up to 4,000 N and rotating speed up to 3,200 rpm. It is found that the coefficient of friction increases with decreasing rotating speed and normal force. The friction coefficient of carbon nano-oil is 0.023, while that of pure oil is 0.03 under the conditions of refrigerant gas R-22 at the pressure of 5 bars. It is believed that carbon nano-particles can be coated on the friction surfaces and the interaction of nano-particles between surfaces can be improved the lubrication in the friction surfaces. Carbon nano-oil enhances the characteristics of the anti-wear and friction at the thrust slide-bearing of scroll compressors.

Key words: Scroll Compressor(스크롤 압축기), Thrust Bearing(스러스트 베어링), Nano-Lubricant (나노 윤활제), Nano Carbon (나노 탄소)

1. 서론

스크롤 압축기는 중, 소형 에어컨용으로 많이 사용되는 압축기다. 스크롤 압축기는 로터리식 압축기나 왕복동식 압축기에 비해 소음이나 진동, 효율 면에서 우수한 성능을 나타내지만, 스크롤 압축기의 스러스트 베어링이 파손되는 문제가 많이 보고되고 있다. 스러스트 베어링에서의 마찰

손실은 스크롤 압축기 내부의 여러 다른 마찰부의 손실에 비하여 큰 비율을 차지하고, 전체적인 에어컨 사이클의 성능 및 효율을 악화시키는 요인이 되기도 한다.¹ 그러나 현재까지 스러스트 베어링에서의 마찰 손실 및 마찰 특성에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않았다. 따라서 많은 연구자들은 스러스트 베어링에 적용되는 여러 오일들의 마찰 및 마모 특성을 분석하여 마찰손실을 줄이

기 위해 연구를 진행하고 있다.^{2,3} 그 결과 여러 종류의 오일에 나노 입자를 첨가하여 윤활 특성을 향상시킨다는 내용의 연구결과가 발표되고 있다.^{4,5} 본 연구에서는 나노 입자를 첨가한 냉동기유(이하 나노 오일)와 입자를 첨가하지 않은 기존의 냉동기유(이하 기존 오일)를 사용하여 스러스트 베어링의 마찰 및 마모 특성 결과를 비교하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

냉동기유는 일반적인 윤활과 달리 냉매와 혼합하여 작동하는 운전조건하에서 사용된다. 냉동기유의 윤활성을 측정하기 위하여, 본 연구에서는 냉매와 냉동기유가 공존하도록 하기 위하여 밀폐식 스러스트 슬라이딩 베어링 실험장치(Thrust slide-bearing experimental apparatus)를 제작하였다.

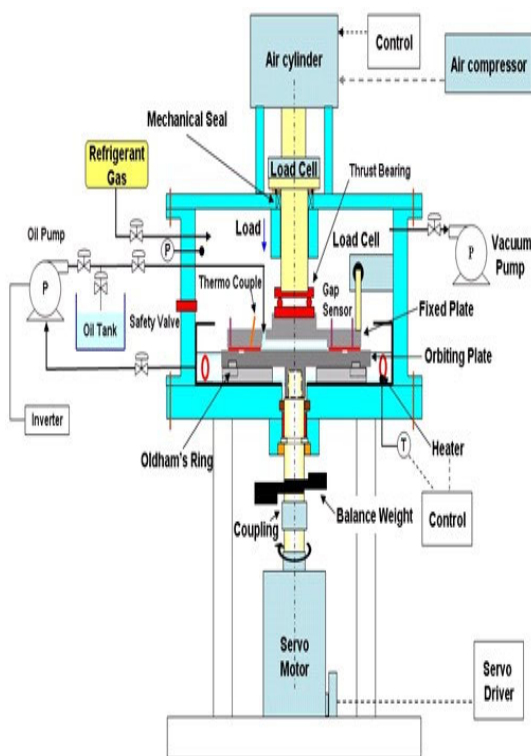


Fig. 1 Schematics of a thrust slide-bearing experimental apparatus for evaluating the characteristics of friction of pure oil and nano-oil

Table 1 Thrust slide-bearing experimental apparatus spec

Thermo-couple	T type
Gap sensor	Max 2,400 μm Resolution limit 5 μm
Servo motor	Max 3,000 rpm
Air cylinder	Max 5,000 N
Road cell	Max 5,000 N
Full size	Length 140 cm Width 80 cm
Fixed plate	External diameter 110 mm Inside diameter 58 mm Thickness 12 mm
Rotating plate	External diameter 133 mm Thickness 9.5 mm
Plate material	GC250

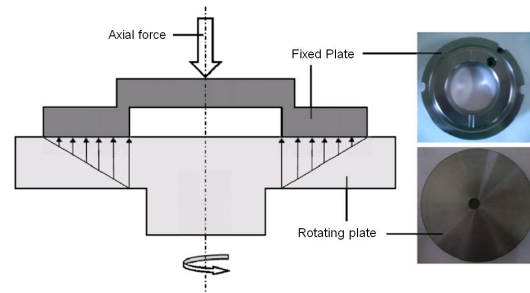


Fig. 2 Simplified model of the fixed and rotating plates showing the axial force and the pressure distribution acting on the friction surfaces in the sliding thrust bearing of scroll compressors

스러스트 슬라이딩 베어링 실험장치는 Table 1 과 같은 사양으로 제작했으며, Fig. 1 과 같은 밀폐형 공간을 가지고 있다. 스러스트 슬라이딩 베어링 실험장치는 회전 운동을 유발시키는 모터, 접촉부인 고정 시편과 회전 시편, 냉동기유와 냉매의 혼합을 유지하는 밀폐형 챔버, 마찰력과 마찰 표면 온도를 측정하는 측정 장치, 오일의 순환과 예열 시키는 펌프 및 히터로 구성되어 있다.

실제 스크롤에서 모터의 회전력으로 상단의 스크롤 사이에 냉매가스가 압축되면서 기밀을 유지하기 위하여 스크롤과 바닥면이 하중을 받아 마찰이 발생하게 되는데 이를 모사하여 장치를 제작하였다.

윤활유는 오일펌프에 의해 마찰면에 공급되는데, 마찰면의 반경방향 안쪽으로 공급되어 바깥쪽으로 빠져 나가도록 장치가 설계되었다. 회전 시편과 고정 시편은 밀폐된 챔버 내부에 위치하고, 밀폐된 공간은 5 bar 의 R-22 냉매로 채워진다. 실험을 시작하기 전에 오일의 온도는 80℃로 PID 온도 제어 장치를 이용하여 유지되도록 하는데, 이는 실제 스크롤 압축기에서 스러스트 베어링으로 유입되는 윤활유의 온도와 동일하다.⁶

실제 스크롤 압축기의 Max force 는 3773 N 이며, Max speed 는 7200 rpm 이하이다. 실제 조건을 모사하기 위해 하중은 0 ~ 4000 N 범위 내에서 실험하였으며, 회전속도는 장치 제작 한계로 인해 3000 rpm 까지 실험을 수행하였다.

회전 시편은 모터에 의해 구동되어 회전을 하게 되고, 마찰 면을 통하여 마찰력이 상부의 고정 시편에 작용한다. 고정 시편은 마찰력에 의해서 회전력이 발생하고, 챔버 측면에 고정된 로드셀에 전달되어 마찰력을 측정한다. 이 때 로드셀에 작용하는 힘을 측정하여 마찰면에 작용하는 마찰력을 측정할 수 있다. 마찰 표면 온도는 두 개의 열전대를 고정 시편 안쪽과 바깥쪽에 장착하여 측정한다. 마찰력과 마찰 표면 온도는 고정 시편에 작용하는 수직하중과 회전 운동의 회전수를 변화시켜 가며 측정한다. 마모는 실험 후 표면 거칠기 변화와 오일 탄화 깊이를 Glow discharge spectrometer(GDS) 방법으로 분석 수행하여 결과를 비교 분석하였다. Fig. 2 는 Fixed Plate 와 Rotating Plates 가 직접 마찰을 일으키는 부분을 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

Table 2 Results of extreme-pressure of pure and nano oil

Type	Pure oil	Nano particles	Breaking pressure of the oil film
Pure oil	Mineral oil	None	below 120 kgf/cm ²
Nano-oil I	Mineral oil	0.1 wt% carbon nano-particles	270 kgf/cm ²
Nano-oil II	Mineral oil	0.3 wt% carbon nano-particles	270 kgf/cm ²

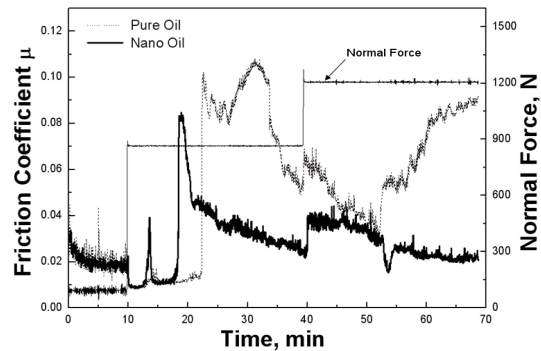


Fig. 3 Results of friction coefficient of pure oil and nano-oil using disk on disk type experimental apparatus under the condition of R22 refrigerant

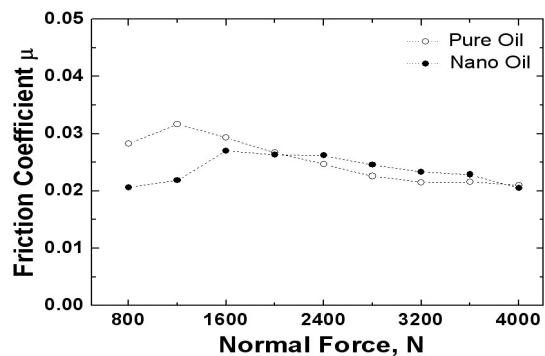


Fig. 4 Lubrication results of friction coefficient as a function of the normal force using the thrust slide-bearing experimental apparatus at the rotating speed of 1,800rpm and the normal force up to 4,000 N

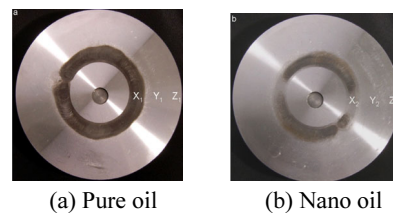


Fig. 5 Image of wear and surface roughness of the rotating plate at the rotating speed of 1,800 rpm and the normal force up to 4,000N for a 90 minutes test period

Table 2 은 기존 오일과 나노 오일을 ASTM D 3233 에 의거하여 측정된 극압 성능 실험결과를 나타내었다.⁷ 극압 성능은 윤활과 마모의 특성을 평가하는 중요한 기준이다. 탄소 나노 입자를 0.1

wt%, 0.3 wt%를 첨가한 나노 오일의 극압 성능이 기존오일보다 125% 향상되었다. 나노 오일의 극압 성능 향상으로 나노 오일의 유막이 기존오일보다 파괴되기 어렵고, 시편사이의 고체 접촉을 발생하는 기회를 적게 만든다. 기존오일의 물성치는 밀도는 15 °C에서 0.915 g/cm³, 점도는 40 °C에서 54.6 mm²/s, 100 °C에서 6.06 mm²/s 이다.

Fig. 3 은 R-22 냉매 분위기에서 500 rpm 의 속도로 회전 시 기존오일과 나노 오일의 마찰계수 측정 결과를 나타내었다. 나노 오일의 최대 마찰계수는 0.085 이다. 반면에 기존오일의 최대 마찰계수는 0.11 이다. 최대 마찰계수에 도달한 이후 두 오일의 마찰계수는 감소한다. 이것은 두 오일로 인해 두 시편 사이에 길들임 현상(polishing effect)이 발생되었기 때문이다. 길들임 현상이란 초기 슬립동면의 거칠기가 크기 때문에 마찰이 크게 발생하다가 거칠기가 서서히 줄어들며 일정해 지는 현상이다. 나노 오일의 길들임 현상이 기존오일보다 우수하여 마찰계수의 감소폭이 크게 나타난다. 이것은 나노 오일에 포함된 탄소 나노 입자들과 시편 표면 돌기 사이의 상호작용으로 인한 것이다.^{7,8}

Fig. 4 는 스러스트 슬라이딩 베어링 실험장치를 이용하여 회전속도 1,800 rpm 에서 수직하중 변화에 따라 마찰계수를 측정한 결과를 나타내었다. 회전시편의 회전속도를 1,800 rpm 으로 고정하고, 고정시편에 수직하중을 800 ~ 4000 N 으로 증가시키며 실험을 수행하였다.

Fig. 4 에서 나노 오일과 기존오일의 마찰계수의 범위가 0.02 ~ 0.03 으로 나타났다. 저 하중 영역에서는 나노 입자가 시편 표면에 작용하여 금속간의 접촉이 감소하게 된다. 특히 수직 하중 800 N 에서 1,600 N 영역 사이에서는 나노 오일의 마찰계수가 약 0.023 인 반면에 기존오일의 마찰계수는 약 0.03 으로 나노 오일의 윤활성이 저 하중 영역에서 향상되었음을 확인 할 수 있다.

Fig. 5 는 회전속도를 1,800 rpm 으로 고정하고, 고정시편에 수직하중을 800 N ~ 4000 N 으로 증가시키며 실험 후, 회전 시편의 마모상태를 나타내었다. 회전 시편의 검은색 원형 띠는 고정 시편의 안쪽 영역과 일치하는 영역이다.

검은색 원형 띠는 오일의 탄화 흔적으로 고정 시편의 빼기 현상에 의해서 국부적으로 마찰 표면 온도가 증가하여 나타난 결과이다. 마모 특성은 일반적으로 마모량으로 나타낸다. 본 실험에서는 낮은 마찰력과 함께 마모량이 매우 적어서 마모량

Table 3 Surface roughness of the rotating plate at the rotating speed of 1800rpm and normal forces up to 4000N for a 90 min test period (locations of X1,X2, Y1,Y2 ,Z1 and Z2 are shown in Fig. 5)

Location	Surface roughness(μm)	
	Pure oil	Nano-oil
X ₁ ,X ₂	1.1	1.0
Y ₁ ,Y ₂	2.5	1.1
Z ₁ ,Z ₂	1.3	1.2

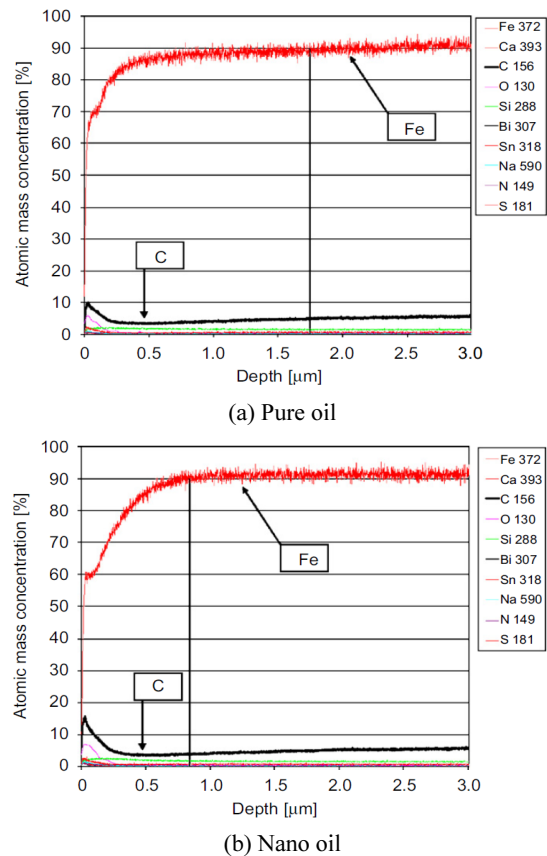


Fig. 6 GDS profiling for measuring the depth of oil carbonization of the rotating plate at the rotating speed of 1,800 rpm and the normal force up to 4,000 N for a 90 minutes test period

비교 분석은 수행하지 않았다. 따라서 마모량보다는 표면의 손상을 나타내는 오일 탄화 흔적과 깊이를 측정함으로써 마모상태를 비교하였다.

Table 3 은 Rotating Plates 의 표면 거칠기 측정 결과로 기존의 Y 점에서 표면 거칠기가 2.5 μm 이

고 나노 오일의 경우 1.2 μm 로 기존보다 거칠기가 작다. 이 결과는 나노 오일의 경우 윤활성의 향상으로 마모가 기존에 비해 적게 일어나기 때문에 오일 탄화 성분과 같은 가스 성분이 Rotating Plates 의 표면에 깊이 침투하지 못하는 것이다.

Fig. 6 은 회전속도를 1,800 rpm 으로 고정하고, 고정시편에 수직하중을 800 ~ 4,000 N 으로 증가시키며 실험을 수행한 후 회전 시편의 오일 탄화 깊이를 Glow discharge spectrometer (GDS)로 분석한 결과이다. 오일의 탄화 깊이는 고정 시편과 회전 시편의 굽힘 현상과 마모로 인해 발생하는 깊이이다. 이 깊이가 크면 물리적인 굽힘 현상과 마모가 많이 발생 되었다는 것을 의미한다. 기존오일의 오일 탄화 깊이는 약 1.7 ~ 1.8 μm 인, 반면에 나노 오일은 0.7 ~ 0.8 μm 로 분석되었다. 그러므로 나노 오일은 스크롤 압축기의 스러스트 베어링의 내마모성을 향상시킨다.

4. 결론

본 연구에서는 스크롤 압축기의 스러스트 베어링에서의 윤활 특성을 파악하기 위하여 기존오일과 나노 오일을 이용하여 각각의 윤활 특성을 분석하였다. 실험은 5 bar 의 냉매 분위기 하에서 운전 조건의 변화에 따르는 마찰 특성의 변화를 관찰하기 위하여 회전 속도 1,800 rpm 에서 수직하중을 800 ~ 4,000 N 으로 변화 하면서 분석을 수행하였다. 탄소나노 입자를 포함한 나노 오일의 마찰 계수는 1200 N 이하에서 0.023 로 측정된 반면, 기존오일은 0.03 으로 측정되었다. 이는 탄소 나노 입자가 마찰 표면에 코팅이 되어 마찰 표면 사이에 탄소 나노 입자의 상호작용으로 인해 나노 오일의 윤활 특성이 향상되었기 때문이다. 또한 Glow discharge spectrometer (GDS) 분석 결과 기존오일의 오일 탄화 깊이는 약 1.7 ~ 1.8 μm 인, 반면 나노 오일은 0.7 ~ 0.8 μm 로서 압축기 스러스트 베어링의 내마모성을 향상시키는 것으로 분석되었다.

참고문헌

- Okaichi, A., Hasegawa, H. and Nishiwaki, F., "A Study on Lubrication Characteristics of Journal and Thrust Bearings in Scroll Compressors," Proc. of International Compressor Engineering, Paper No. C116, 2004
- Drost, R. T. and Quesada, J. F., "Analytical and Experimental Investigation of a Scroll Compressor Lubrication System," Proc. of International Compressor Engineering, Paper No. 846, 1992.
- Park, T. J. and Jo, J. C., "Lubrication Characteristics of Surface Textured Parallel Thrust Bearing - Effect of Bearing Speed," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 597-598, 2010.
- Ku, B. C., Han, Y. C., Lee, J. E., Lee, J. K., Park, S. H. and Hwang, Y. J., "Tribological Effects of Fullerene Nanoparticles Added in Mineral Lubricants According to its Viscosity," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 11, No. 4, pp. 607-611, 2010.
- Liu, G., Li, X., Lu, N. and Fan, R., "Enhancing AW/EP Property of Lubricant Oil by Adding Nano Al/Sn Particles," Tribology Letters, Vol. 18, No. 1, pp. 85-90, 2004.
- Sato, H., Itho, T. and Kobayashi, H., "Frictional Characteristics of Thrust Bearing in Scroll Compressor," Proc. of International Compressor Engineering, Paper No. C027, 2004.
- ASME Standard D 3233, "Standard test methods for measurement of extreme pressure properties of fluid lubricants," 2003.
- Ishii, N., Oku, T., Anami, K. and Fukuda, A., "Lubrication Mechanism at Thrust Slide-bearing of Scroll Compressor(Experimental study)," Proc. of International Compressor Engineering, Paper No. C103, 2004.
- Hsu, S. M., "Nano-lubrication: concept and design," Tribology International, Vol. 37, No. 7, pp. 537-545, 2004.
- Ginzburg, B. M., Shibaev, L. A., Kireenko, O. F., Shepelevskii, A. A., Baidakova, M. V. and Sitnikova, A. A., "Antiwear Effect of Fullerene C60 Additives to Lubricating Oils," Russian Journal of Applied Chemistry, Vol. 75, No. 8, pp. 1330-1335, 2002.