

EHA 펌프용 피스톤 슈 정압베어링의 경계 마찰 성능 개선 Performance Improvement of the Hydrostatic Piston Shoe Bearing of an EHA-Piston Pump under Boundary Friction Conditions

홍예선^{1*} · 권용철² · 김종혁² · 이성렬² · 김병곤³ · 문진삼³ · 김재환³

Y. S. HONG, Y. C. Kwon, C. H. Kim, S. L. LEE, B. K. Kim, J. S. Moon and J. H. Kim

Received: 15 Apr. 2014, Revised: 29 May. 2014, Accepted: 31 May. 2014

Key Words : Swash Plate Type Piston Pumps(사판식 피스톤 펌프), Piston Shoe(피스톤 슈), Hydrostatic Bearing(정압 베어링), Power Loss(동력손실), Wear Rate(마모율), Electro-hydrostatic Actuators(전기 정유압 구동장치), DLC-coating(DLC-코팅)

Abstract: The pumps of electro-hydrostatic actuators operate most frequently in boundary lubrication speed range, as they compensate for the position control errors as a control element. When conventional swash plate type piston pumps are applied to electro-hydrostatic actuators, the frictional power losses as well as the wear rate of sliding components, such as piston shoes can increase drastically under the boundary friction condition. In this paper, the power losses of the piston shoes were investigated which were engendered by a frictional solid-to-solid contact and leakage flow rate of their hydrostatic bearing. In order to reduce them, DLC-coating was applied to the swash plate and the ball joint of pistons along with its effects were demonstrated. In addition, it was also shown that the wear rate of the piston shoes could be markedly reduced using the DLC-coated swash plate.

기호 설명

B : Balance ratio

γ : Inclination angle of swash plate, deg

d_p : Piston diameter, mm

d_r : Recess diameter, mm

d_s : Piston shoe diameter, mm

F_f : Friction force on piston, N

F_l : Lift force on piston shoe, N

F_n : Normal load on piston shoe, N

p_c : Cylinder pressure, bar

p_r : Recess pressure, bar

R_r : Recess ratio(d_r/d_s)

1. 서 론

EHA(electro-hydrostatic actuator)에 사용되는 펌프는 Fig.1에서 보는 바와 같이 구동 실린더의 위치 제어 오차를 보상하는 역할을 한다. 따라서 높은 속도로 일정하게 회전하는 일반적인 펌프와는 달리, EHA용 펌프는 명령 신호에 따라서 가속, 정속 회전, 감속으로 구성되는 속도 패턴을 방향 전환과 더불어 불규칙하게 반복하므로 펌프 요소의 윤활에 불리한 조건에서 주로 작동하게 된다. 특히 항공기의 조종면이나 선박의 조타 장치에 사용되는 EHA의 경우에 자동 순항 중에는 동체의 미세한 자세 보정을 위해

* Corresponding author: yshong@kau.ac.kr

1 Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Goyang-si, Gyeonggi-do 412-791, Korea

2 Aerospace & Mechanical Engineering, Graduate School, Korea Aerospace University, Goyang-si, Gyeonggi-do 412-791, Korea

3 Yoowon Industries LTD., Busan 604-030, Korea

Copyright © 2014, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

작동하므로 펌프의 회전 속도는 경계 윤활 영역을 벗어나지 못할 수 있다. 이런 이유로 EHA용 펌프로써 사판식 피스톤 펌프를 사용하여 높은 효율을 추구한다면 피스톤, 밸브 플레이트, 피스톤 슈의 마찰 동력 손실과 마모가 경계 윤활 조건에서 얼마나 증가하는 지 확인하고, 이에 대한 보완이 필요하다.

저속 마찰 영역에서 피스톤이나 밸브 플레이트의 마찰 특성을 연구한 사례는 있으나[1,2,3], 피스톤 슈에 대한 연구 사례는 대부분 경사판의 각도가 영인 조건에서 이루어지는 유체 윤활을 전제로 하였다 [4,5,6,7,8,9]. 이것은 경사판 위의 피스톤 슈의 미세하고 난해한 거동을 경계윤활 영역에서 규명하려면 피스톤과 볼 조인트의 경계 마찰 특성에 대한 정확한 정보도 요구되고, 경사판과 모서리가 접촉하는 피스톤 슈 자체의 부양력을 정확히 계산하거나 측정하는 것은 현존하는 기술로는 거의 불가능에 가깝기 때문이다. 이에 비하면 피스톤 슈나 볼 조인트 자체의 경계 윤활 마찰력을 실험적으로 측정하는 것은 비교적 용이하나, 이러한 사례들도 실험 장치의 제작이 어려우므로 매우 적은 편이고 상당히 오래 전에 공개된 것들이다 [10,11].

본 논문에서는 선박 조타용 EHA를 위한 사판식 피스톤 펌프를 설계하는 연구의 일환으로서 경계 윤활 조건에서 피스톤 슈 정압 베어링의 동력 손실과 피스톤 슈의 마모를 줄이기 위해 경사판과 피스톤 볼 조인트의 표면 특성을 DLC (Diamond Like Carbon) 박막으로 개질하였다. 참고로 DLC-코팅은 마찰 저항과 마모를 줄이는 효과가 탁월하여 금형의 수명을 늘리고 회전 부품의 마찰 손실을 줄이는 데

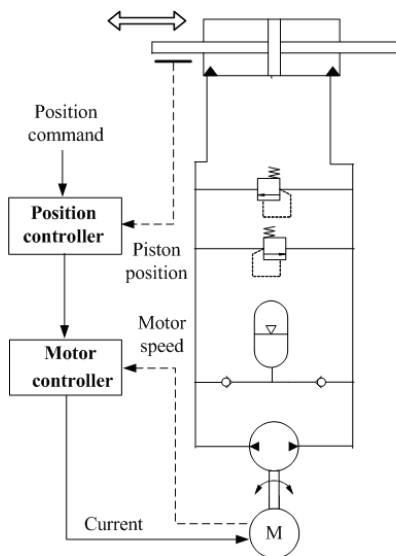


Fig. 1 Typical configuration of EHA system

널리 활용되는 추세에 있다 [12,13]. 본 논문의 주요 내용은 경계 윤활 조건에서 피스톤 슈의 일반적인 거동을 분석한 결과, 피스톤 슈의 마찰과 누설에 대한 실험 방법 및 조건, 경사판과 피스톤 볼 조인트에 DLC 코팅을 응용한 실험 결과로 구성되었다.

2. 경계 윤활 조건에서의 피스톤 슈 거동 분석

원통형의 피스톤 슈는 Fig. 2에서와 같이 3 자유도 볼 조인트에 의해 피스톤과 연결된다. 원형의 리세스와 랜드부로 구성되는 피스톤 슈 정압 베어링의 부양력은 입구 오리피스로 공급된 오일이 랜드부와 경사판 사이의 틈새를 빠져 나가면서 형성되는 리세스 압력과 틈새 압력에 의해 발생된다.

피스톤 마찰력을 무시하면, 피스톤 슈의 평형계수 B는 다음과 같이 정의된다[10].

$$B = \frac{F_l}{F_n} = \frac{1}{2} \frac{d_s^2 (R_r^2 - 1) \cos \gamma}{d_p^2 \ln(R_r)} \frac{p_r}{p_c} \quad (1)$$

평형계수가 1보다 작은 피스톤 슈는 고속에서는 동적인 부양력에 의해 경사판과 완전히 분리될 수 있으나 경계윤활 속도 영역을 포함한 저속에서는 경사판과 고체 마찰을 일으키게 된다. 피스톤 슈가 경사판과 접촉하며 타원 궤적을 따라 이동할 때의 접촉점적은 간단한 기구 해석을 통해 유도할 수 있으며, 밸브 플레이트의 고압 포트와 연결된 실린더 블록이 시계 회전방향으로 회전할 때 접촉점의 궤적은 Fig. 3과 같다[10]. 피스톤이 상사점으로 이동할 때, 오일은 펌프 출구로 송출되며, 이 때 접촉점 P는 피스톤 슈의 바깥 모서리에 놓인다. 평면인 피스톤 슈의 모서리가 경사판과 접촉하는 것은 피스톤 슈가

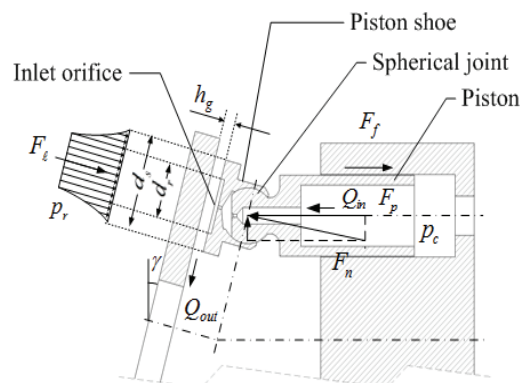


Fig. 2 Basic structure of hydrostatic piston shoe bearing

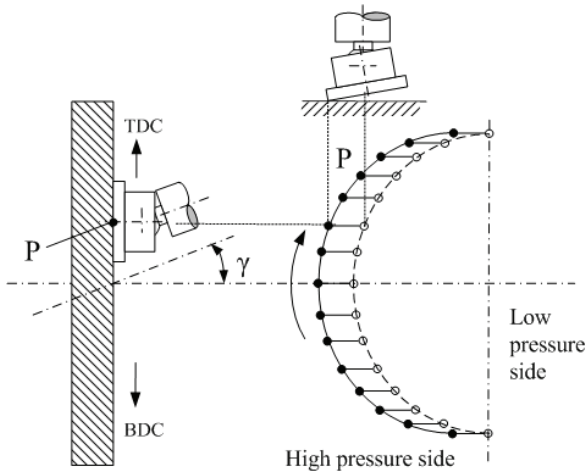


Fig. 3 Trajectory of contact points between piston shoe and swash plate

기울어져야만 가능하다. 이 때 틸팅각과 고체 마찰을 일으키는 접촉력의 크기는 경사판, 피스톤 볼 조인트 그리고 피스톤의 마찰력에 의해 큰 영향을 받는다.

피스톤 슈의 틸팅각이 크면 경사판과 피스톤 슈 사이의 틈새는 썩기 모양이 되어 평행 틈새일 때에 비해 누설 유량이 크게 증가한다. 그리고 피스톤 슈가 기울어진 상태에서 고체 마찰을 일으키면 피스톤 슈 모서리의 마모 속도가 증가하여 피스톤 슈의 부양력과 복원모멘트는 더 감소한다. 피스톤 슈 모서리의 마모는 장기적으로는 피스톤 슈의 누설과 마찰력을 더 증가시킬 수 있다. 따라서 경계 마찰 조건에서 피스톤 슈 정압 베어링의 동력 손실과 수명을 개선 시키려면 고체 마찰력에 영향을 주는 평형계수와 복원 모멘트에 영향을 주는 리세스 비를 최적으로 조합하는 것이 중요한데, 이것은 피스톤 슈의 크기, 마찰 표면의 특성에 따라 달라지기 때문에 많은 실험적 시행착오를 필요로 한다[14].

3. 실험 방법 및 조건

본 논문에서 피스톤 슈 정압 베어링의 마찰력과 누설 유량을 측정하기 위해 제작한 실험장치의 기본적인 구성은 Fig. 4와 같다. 하나의 피스톤으로 구성된 실린더 블록은 타이밍 벨트로 연결된 7 kW 서보 모터에 의해 회전하며, 로터리 조인트를 통해서 실린더 챔버로 오일이 흡입, 송출된다. 실린더 블록의 회전각에 따라 실린더 챔버에 저압(10bar)의 오일을 공급하거나, 송출 오일에 고압(50bar)의 부하 압력을 인가하여 밸브 플레이트와 동일한 동작이 이루어지도록 솔레노이드 밸브를 사용하였다. 실린더 블록의

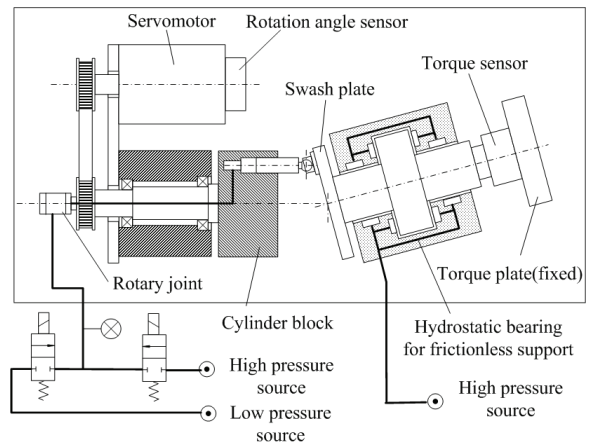
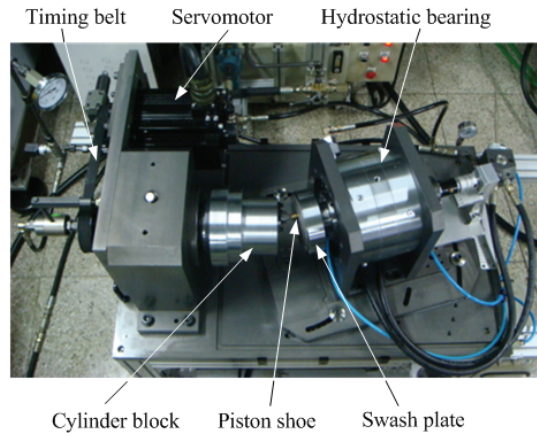


Fig. 4 Experimental apparatus for measuring piston shoe friction torque

회전축에 대해 15°로 기울어진 경사판에 피스톤이 가하는 수직 부하를 마찰 없이 지지하면서 피스톤 슈의 미세한 마찰력을 비회전형 토크 센서에 전달하기 위해 유정압 베어링을 사용하였다. 누설 유량은 누설 오일의 누적된 무게를 전자 저울로 측정하여 그 증가율에 오일의 밀도를 반영함으로써 간접적으로 확인하였다. 실험에 사용된 오일은 윤활 및 마모 방지용 일반 유압 작동유(RANDO HD ISO 46)이다.

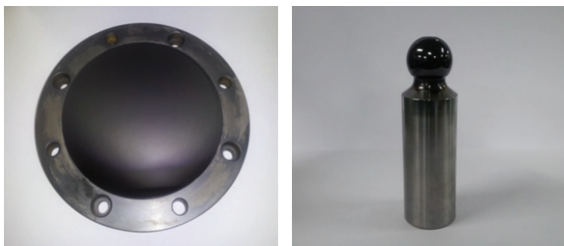
실험에 사용된 피스톤 슈는 기본적으로 1,800rpm을 정격 기준으로 설계되어 저속 회전 조건은 전혀 고려되지 않은 것으로 그 사양은 Table 1과 같다. 실험에 사용된 경사판과 볼 조인트의 종류 및 표면 처리 조건은 Table 2와 같다. DLC 코팅을 하지 않은 경사판과 볼 조인트의 표면은 기본적으로 질화 처리를 통해 경화된 상태이며, 피스톤 슈는 일반적인 소재를 사용하여 제작되어 초기 표면 조도는 Ra=0.02 μm로 설정하였다. 경사판과 볼 조인트의 DLC 코팅은 PVD 공정에 의해 이루어졌으며[15] 실험에 사용된 시편들의 실제 형상은 Fig. 5와 같다.

Table 1 Specifications of the piston shoe for performance test

Items	Dimension
Shoe diameter(d_s)	28 mm
Recess diameter (d_r)	22 mm
Recess ratio(R_r)	0.786
Balance ratio(B)	0.96
Inlet orifice diameter(d_o)	1.4 mm
Piston diameter(d_p)	25 mm

Table 2 Surface roughness and hardness data for swash plate and ball joint

Components	Surface Condition	Roughness (R_a)	Hardness (Hv)
Swash plate	Non-coated	0.175 μ m	883.2
	DLC-coated	0.01 μ m	2,500~2,800
Ball joint	Non-coated	0.207 μ m	767.4
	DLC-coated	0.01 μ m	2,500~2,800



(a) Swash plate (b) Ball joint of piston

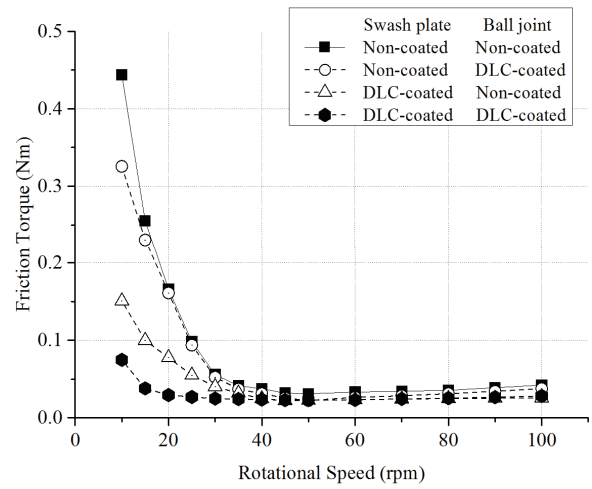


(c) Piston shoe assembly

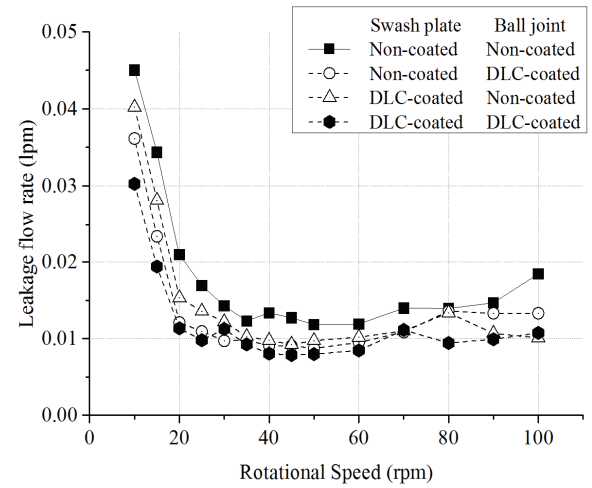
Fig. 5 Specimens for piston shoe performance tests

4. 실험 결과

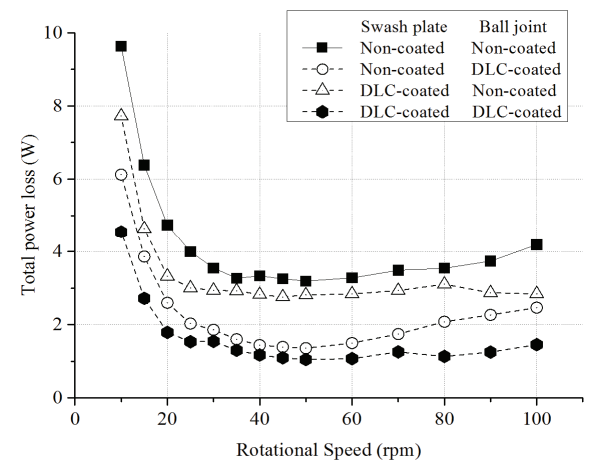
Fig. 6은 10rpm에서 100rpm까지 실린더 블록의 회전 속도를 서서히 변화시키며 피스톤 슈의 평균 마찰력과 피스톤 슈에서 누설된 유량을 측정된 결과이다. 40rpm 미만의 저속구간에서 경사판과 볼 조인



(a) Mean frictional torque

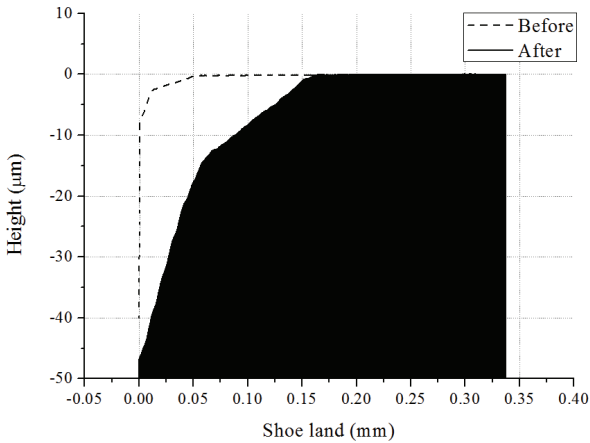


(b) Mean leakage flow rate during discharge stroke

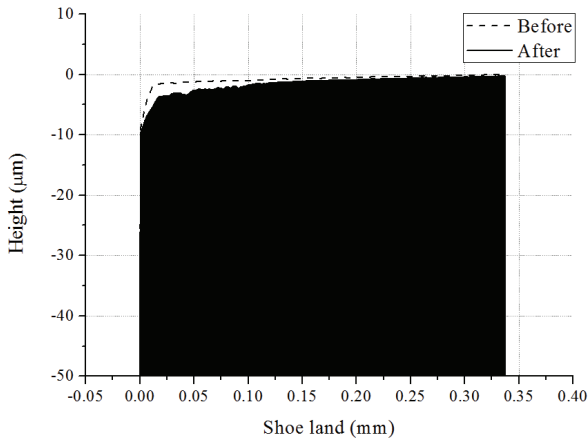


(c) Total power losses

Fig. 6 Mean friction torque, mean leakage flow rates & total power loss when the rotational speed was changed from 10rpm to 100 rpm



(a) Wear depth of the piston shoe with non-coated swash plate and ball joint



(b) Wear depth of the piston shoe with DLC-coated swash plate and ball joint

Fig. 7 The wear rate of the piston shoe under boundary lubrication condition

트 모두 DLC 코팅된 시편을 사용한 경우와 그렇지 않은 경우의 실험 결과를 비교하면 평균 마찰 토크는 60% 이상, 누설 유량은 30% 가량 감소하였다. Fig. 6a의 평균 마찰 토크 측정 결과에 의하면 피스톤 슈의 마찰력은 피스톤 슈와 직접 접촉하는 경사판에 DLC-코팅을 하여 효과적으로 감소시킬 수 있는 것을 알 수 있다. 반면에, 누설 유량의 감소 효과는 Fig. 6b에서 보는 바와 같이 피스톤의 볼 조인트에 DLC 코팅을 하는 것이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 피스톤 슈 정압 베어링의 전체 동력 손실은 누설 유량에 의한 손실이 대부분을 차지하므로 Fig. 6c에서 보는 바와 같이 볼 조인트의 코팅을 통해 효과적으로 감소시킬 수 있다. 그러나 고체 마찰에 의한 피스톤 슈 랜드의 마모를 줄이기 위해서는 경사판의 코팅이 필수적이다.

회전속도 35rpm, 송출압력 50bar에서 1시간 동안 연속으로 실린더 블록을 회전시킨 후 피스톤 슈의 마모 정도를 측정한 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7a는 DLC 코팅을 안 한 시편을 사용한 경우로서 실험 전과 실험 후 피스톤 슈 모서리의 단면 형상을 보여준다. 여기서 모서리의 최대 마모 깊이는 평균적으로 30 μ m 정도로 나타났다. 이에 반해 경사판과 볼 조인트 모두 DLC 코팅된 시편을 사용한 경우 Fig. 7b와 같이 최대 마모 깊이는 4 μ m 정도에 불과하여 마모 속도가 크게 감소한 것을 볼 수 있다. 만일 회전속도를 35 rpm보다 더 낮추어 고체 마찰 현상을 강화하고, 실린더 압력을 더 높였으면 마모량의 차이는 더 크게 나타났을 것이다.

본 논문에서는 고속에서 정속으로 회전하는 사판식 피스톤 펌프를 위해 설계된 피스톤 슈를 저속 영역에서 사용하였을 때 나타나는 성능을 기준으로 경사판과 볼 조인트의 DLC 코팅 효과를 비교하였다. 그러나 피스톤 슈 자체를 경계 윤활 조건에 적합하도록 개선하면 동일한 실험 조건에서 DLC 코팅의 효과가 더 극대화 되므로 피스톤 슈의 적절한 설계도 병행되어야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 사판식 피스톤 펌프의 경사판과 피스톤 볼 조인트에 DLC 박막을 코팅하여 40rpm 미만의 저속 영역에서 피스톤 슈 정압 베어링의 마찰력과 누설 유량, 피스톤 슈 모서리의 마모 속도가 크게 개선됨을 실험적으로 확인하였다. 특히, 경사판에 DLC 코팅을 한 경우에는 피스톤 슈의 마찰력과 마모 속도를 감소시키는 효과가 나타났고, 피스톤 볼 조인트에 DLC 코팅을 하는 경우는 피스톤 슈 정압 베어링의 누설 유량이 감소하는 효과가 나타났다.

향후 계획으로서 실린더 블록의 회전 속도 파형이 마찰 손실과 누설 유량, 마모에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

후 기

본 연구는 동남권 광역경제권 선도산업 R&D 사업단의 “조타용 전동유압펌프 효율 향상을 위한 제어 시스템 개발“ 과제(과제 번호 A0022-00201)와 한국연구재단의 중견연구자지원사업(과제번호 NRF2011-0015640)의 지원을 받아 수행된 것이다.

References

- 1) S. Y. Lee, B. Kim, S. D. Kim, G. Kim and Y. S. Hong, "Effect of Si doping on the wear properties of CrN coatings synthesized by unbalanced magnetron sputtering", *Thin Solid Films*, Vol. 506-507, pp.192-196, 2006
- 2) Y. S. Hong and S. Y. Lee, "A comparative study of Cr-X-N(X=Zr, Si) coatings for the improvement of the low-speed torque efficiency of a hydraulic piston pump", *Metals and Materials Int.* Vol. 14, No.1, pp.33-40, 2008
- 3) H. Murrenhoff, U. Piepenstock and T. Kohmascher, "Analyzing losses in hydrostatic drives", *Proc. of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power*, pp.103-108, 2008
- 4) C. J. Hooke and Y. P. Kakoullis, "The lubrication of slippers on axial piston pumps", *5th international fluid power symposium*, pp.13-26, 1978
- 5) E. Koc and C. J. Hooke, "Investigation into the effects of orifice size, offset and overclamp ratio on the lubrication of slipper bearings", *Tribology International*, Vol. 29, No. 4, pp.299-305, 1996
- 6) J. M. Bergada, J. Watton and J. M. Haynes, "The hydrostatic/hydrodynamic behavior of an axial piston pump slipper with multiple lands", *Meccanica*, Vol. 45, pp.585-602, 2010
- 7) R. E. Johnson and N. D. Manring, "Translating circular thrust bearings", *J. Fluid Mech.*, Vol. 530, pp.197-212, 2005
- 8) A. Schenk and M. Ivantysynova, "An Investigation of the impact of elasto-hydro-dynamic deformation on power loss in the slipper swash plate interface", *Proc. 8th JFPS Int. Symposium on Fluid Power*, pp.228-234, 2011
- 9) U. Wiecek, "Ein Simulationsmodell zur Beschreibung der Spaltstroemung in Axialkolbenmaschinen der Schraegscheibenbauart", *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe7, No. 443*, 2003
- 10) O. Böinghoff, "Untersuchen zum Reibungsverhalten der Gleitschuhe in Schrägscheiben-Axialkolbenmaschinen", *VDI-Forschungsheft, VDI-Verlag, Düsseldorf, Vol. 584*, 1977
- 11) S. Kobayashi, M. Hirose, J. Hatsue, and M. Ikeya, "Friction characteristics of a ball joint in the swash plate type axial piston motor", *Proc. 8th International Symposium on Fluid Power*, pp.565-592, 1987
- 12) M. Kano, "DLC coating technology applied to sliding parts of automotive engine", *New Diamond & Frontier Carbon Technology*, Vol. 16, No.4, pp.201-210, 2006
- 13) M. Murakawa, et. al., "Performance of a rotating gear pair coated with an amorphous carbon film under a loss-of-lubrication condition", *Surface & Coatings Technology* Vol. 120-121, pp.646-652, 1999
- 14) Y. S. Hong and Y. C. Kwon, "Investigation on the power losses of hydrostatic piston shoe bearings for swash plate type axial piston pumps under mixed friction conditions", *Proc. of the 9th Int. Fluid Power Conference*, Vol. 2, pp.499-507, 2014
- 15) Creating Nano Technologies Inc., www.creating-nanotech.com