

DLC 코팅에 의한 사판식 피스톤 펌프의 저속 영역 동력 손실 개선 Performance Improvement of a Swash Plate Type Piston Pump in the Low-Speed Range by a DLC Coating

홍예선^{1*} · 김종혁² · 이성렬²

Y. S. Hong, J. H. Kim and S. L. Lee

Received: 18 Aug. 2014, Accepted: 24 Oct. 2014

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

Abstract: This paper details application of a DLC(Diamond Like Carbon)-coating to the swash plate and the ball joint of pistons that make sliding contact with the piston shoes of an axial piston pump. This process, aimed to reduce the frictional and leakage power losses of the hydrostatic piston shoe bearings at the low speed range. At lower speeds than 100rpm, the positive effects of the DLC-coating on the power loss reduction of the hydrostatic piston shoe bearings could be confirmed. These effects resulted in little improvement in volumetric efficiency of the test pump, but the mechanical efficiency could be raised by up to 5% at 100rpm; here, the DLC-coated swash plate played a more dominant role than the DLC-coated ball joint.

기호 설명

- B : Balance ratio
- γ : Inclination angle of swash plate, °
- 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. 서론

유압식 구동장치의 내부 동력 손실을 줄이기 위해 펌프의 회전속도를 직접 변화시켜 유압 실린더로 공급되는 유량을 제어하는 EHA (electro-hydrostatic actuator)가 개발되기 시작하면서 펌프의 설계 요구 조건에 큰 변화가 생겼다. 즉, EHA에 사용되는 펌프는 구동 실린더의 위치제어기로부터 출력되는 신호에 따라서 불규칙한 속도로 회전하기 때문에 펌프 요소에 정상 상태의 윤활 기능이 발휘되기 어려우며, 특히 펌프의 마찰면 사이에 유체 윤활막이 형성되지 못하는 저속 영역에서는 고체 마찰과 마멸이 발생할 수 있다. 이런 이유로 EHA용 펌프로서 Fig. 1과 같은 사판식 피스톤 펌프를 사용하려면 피스톤, 밸브 플레이트, 피스톤 슈의 마찰 특성이 펌프의 저속 영역에서 얼마나 증가하는 지 확인하고, 보완해야 한다.

* 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

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.

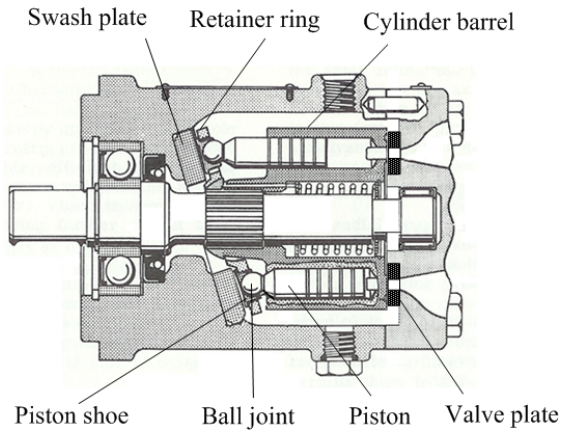


Fig. 1 Typical structure of swash plate-type piston pump

저속 영역에서 피스톤이나 밸브 플레이트의 마찰 특성을 연구한 사례는 여럿 있으나¹⁻³⁾, 피스톤 슈에 대한 연구는 대부분이 실험과 해석이 가능하도록 경사판의 각도가 영이고 피스톤 슈와 경사판 간에 유체 윤활이 형성되는 것을 전제하여 수행되었다.⁴⁻⁷⁾ 실제 경사판 위에서 공전하는 피스톤 슈나 볼 조인트 자체의 마찰력을 실험적으로 측정하는 사례는 매우 희귀하고 대부분 25~35년 전에 수행된 것들이다.^{8,9)} 일반 유압 펌프들이 주로 유체 윤활 조건을 가정하여 최적화되어 왔기 때문에 EHA에 사용될 유압 펌프는 저속 회전, 급가속, 방향 전환 등의 특이한 작동 조건에서 윤활성능이 검증되어야 한다.

본 논문에서는 EHA용 사판식 피스톤 펌프를 설계하는 연구의 일환으로서 저속 영역에서 피스톤 슈 정압 베어링의 동력 손실을 줄이기 위해 경사판과 피스톤 볼 조인트의 표면을 DLC (Diamond Like Carbon) 박막으로 개질하였다. DLC-박막 코팅을 베인 펌프에 응용하여 마찰 손실을 줄이고 내마모성을 개선한 사례들이 소개된 바 있으며, 내연기관의 밸브 트레인, 각종 금형에도 응용되어 내구성이 입증되고 있다.^{10,11)}

본 논문에는 배제 용적이 22cm³/rev인 실험용 펌프의 피스톤 슈 사양, 관련 부품들의 DLC 코팅 결과 및 실험 조건, 저속 영역에서 피스톤 슈의 마찰과 누설을 개선한 결과, 개선된 피스톤 슈의 성능에 의해 펌프 전체의 체적 효율, 기계효율, 전 효율이 개선된 결과들을 기술하였다.

2. 피스톤 슈 실험 모델

피스톤 슈는 Fig. 2에서와 같이 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 B 는 다음과 같이 정의된다.⁸⁾

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

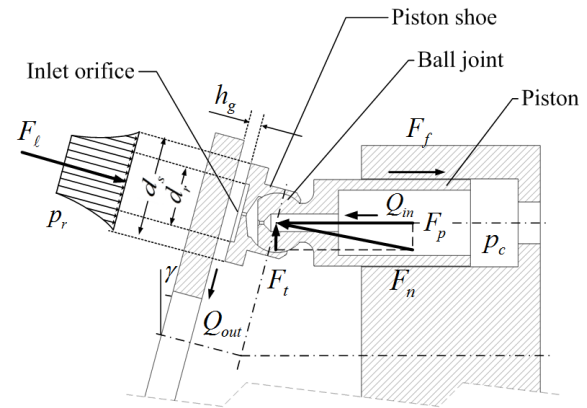


Fig. 2 Basic configuration of hydrostatic piston shoe bearing

실험에 사용된 피스톤 슈는 기본적으로 1,800rpm의 정격 회전속도를 기준으로 설계된 가변 용적형 사판식 피스톤 펌프(YUKEN, model A22)의 것으로 기본 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of the piston shoe for performance tests

Items	Dimension
Shoe diameter(d_s)	17 mm
Recess diameter (d_r)	11.5 mm
Recess ratio(R_r)	0.676
Balance ratio(B)	0.921
Inlet orifice diameter	0.68 mm
Piston diameter(d_p)	14.5 mm

3. 실험 조건 및 방법

실험에 사용된 경사판과 볼 조인트의 표면 처리 조건별 종류는 Table 2와 같다. DLC 코팅을 하지 않

은 경사판과 볼 조인트의 표면은 기본적으로 절화 처리를 통해 경화되었으며, 피스톤 슈는 순정 부품을 사용하였다. 경사판과 볼 조인트의 DLC 코팅은 PVD(Physical Vapor Deposition) 공정에 의해 이루어졌으며¹²⁾, 실험에 사용된 시편들의 실제 형상은 Fig. 3과 같다. 실험 조건은 Table 3과 같이 DLC 코팅된 부품들의 조합에 따라서 4가지로 구분하였다.

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

Components	Surface Condition	Roughness (R _a)	Hardness (Hv)
Shoe land	Brass	0.052 μm	193.3
Swash plate	Non-coated	0.032 μm	883.2
	DLC-coated	0.012 μm	2,500~2,800
Ball joint	Non-coated	0.0207 μm	767.4
	DLC-coated	0.012 μm	2,500~2,800



(a) Swash plate (b) Piston ball (c) Piston shoe assembly

Fig. 3 Specimens for piston shoe tests

Table 3 Test conditions

Test conditions	I	II	III	IV
Swash plate	Non-coated	Non-coated	DLC-coated	DLC-coated
Piston ball joint	Non-coated	DLC-coated	Non-coated	DLC-coated

본 논문에서 피스톤 슈 정압 베어링의 마찰력과 누설 유량을 측정하기 위해 제작한 실험장치의 기본적인 구성은 Fig. 4와 같다.¹³⁾

피스톤 슈의 저속 성능이 개선된 것을 확인 한 후 펌프 전체의 효율이 개선된 효과를 확인하기 위한 시험장치는 Fig. 5와 같이 구성하였다. 유량 센서로는 KRACHT의 Model VC-1-F-1-PS, 토크 미터로는 Sensor Developments의 Model 01225-152를 사용하였다. 실험에 사용된 오일은 윤활 및 마모방지용

일반 유압 작동유(RANDO HD ISO 46)이고 오일 온도는 모든 시험에서 40 °C를 유지하였다.

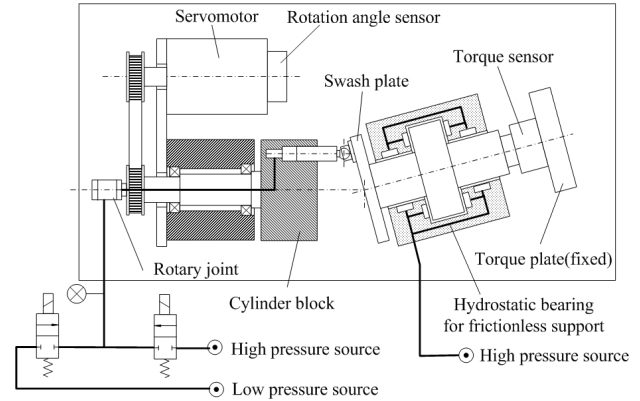


Fig. 4 Configuration of the experimental apparatus for measuring the friction torque & leakage flow of piston shoe

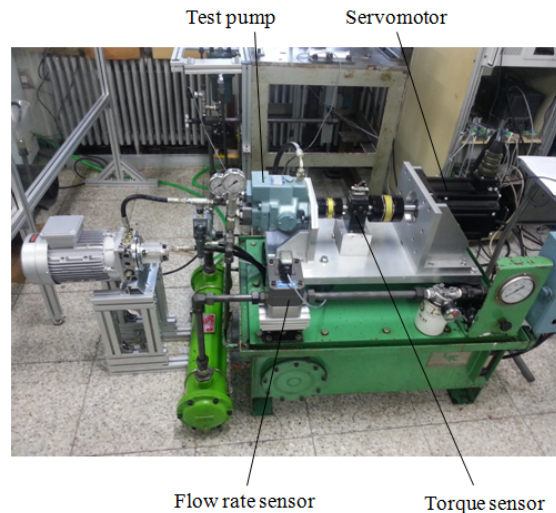
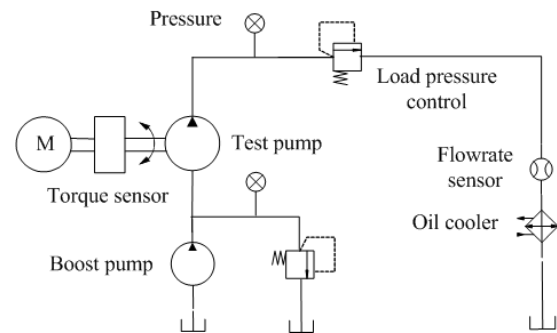


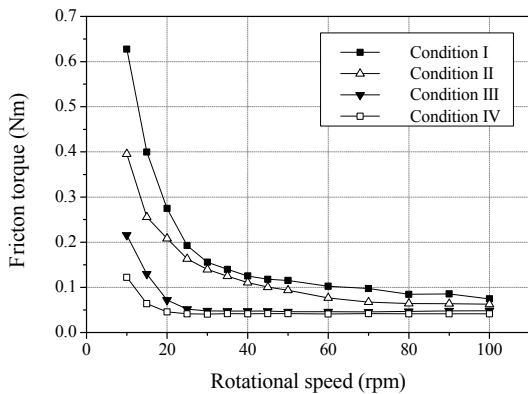
Fig. 5 Configuration of the experimental apparatus for measuring the efficiencies of the test pump

4. 실험 결과

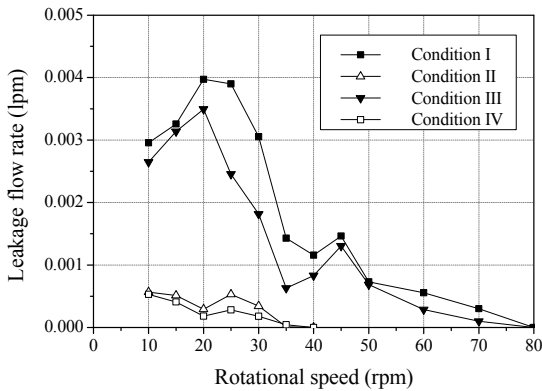
본 논문의 피스톤 슈는 식(1)의 평형계수가 0.921

로서 정지 상태에서는 정적 부양력이 수직 부하보다 작기 때문에 피스톤 슈가 경사판에 밀착된다. 그러나 실린더 배럴이 저속으로 회전하면 피스톤 슈와 경사판은 기하학적으로 점접촉을 하게 되므로 피스톤 슈가 기울어지고 그 기울기각은 경사판과 볼 조인트의 마찰력에 의해 증가된다.¹³⁾

Fig. 6은 실린더의 송출 압력이 100bar인 조건에서 10rpm에서 100rpm까지 실린더 블록의 회전 속도를 서서히 변화시키며 피스톤 슈의 평균 마찰력과 피스톤 슈에서 누설된 유량을 측정하여 얻은 결과이다. 40rpm 미만의 저속구간에서 누설이 생기는 것은 정지 상태에서 경사판과 밀착되어 있던 피스톤 슈가 이 구간에서는 기울어지는 것을 의미하고, 마찰력이 정지 마찰력으로부터 감소하는 것은 기울어진 피스톤 슈의 모서리가 경사판과 닿아 고체 마찰을 일으키면서 유체 윤활 효과가 점차 증가한 것을 보여주는 것이다. 경사판과 볼 조인트 모두 DLC 코팅된 시편을 사용한 경우(실험조건 4)와 그렇지 않은 경우(실험조건 1)의 실험 결과를 비교하면, 부분적인 고체 마찰이



(a) Mean friction torque

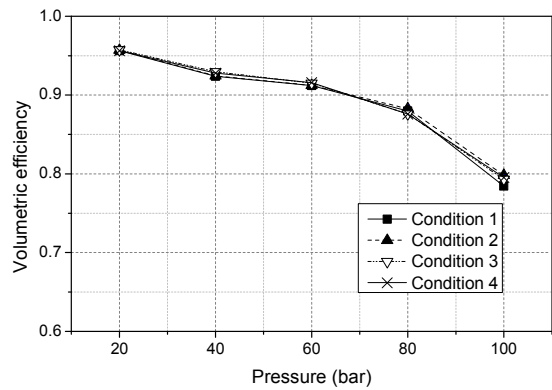


(b) Mean leakage flow rates

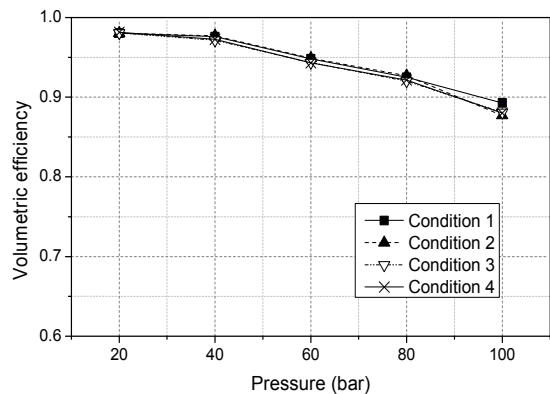
Fig. 6 Mean friction torque & leakage flow rates when the rotational speed was varied from 10rpm to 100rpm

발생되더라도 DLC 코팅에 의해 피스톤 슈에 작용하는 마찰력이 현저히 감소하였고, 이로 인해 피스톤 슈의 기울기각이 감소하였기 때문에 피스톤 슈의 누설 유량도 획기적으로 감소하였다.

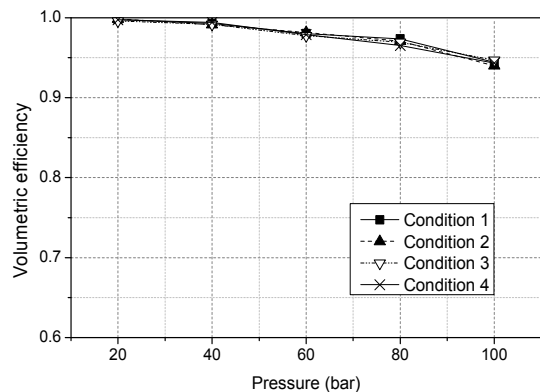
Fig. 6a의 평균 마찰 토크 측정 결과에 의하면 피스톤 슈의 마찰력은 피스톤 슈와 직접 접촉하는 경사판에 DLC-코팅을 하여 효과적으로 감소시킬 수 있었다(실험조건 3). 볼 조인트의 코팅은 피스톤 슈의 마찰 토크를 줄이는 데에는 효과가 적었다(실험조건 2).



(a) 50rpm



(b) 100rpm



(c) 200rpm

Fig. 7 Volumetric efficiency of the test pump

반면에, 누설 유량의 감소 효과는 Fig. 6b에서 보는 바와 같이 피스톤의 볼 조인트에 DLC 코팅을 하는 것이 더 큰 것을 확인할 수 있다(실험조건 2). 실린더 블록의 회전속도가 증가할수록 피스톤 슈의 마찰이 감소하면 피스톤 슈가 경사판에 밀착되어 누설 유량의 측정이 불가능 정도로 감소하는데, 피스톤 슈의 마찰이 클수록 높은 회전속도에서 누설이 줄어들었다.

마찰 토크의 측정 결과에 의하면 100rpm 미만에서는 실린더 블록의 회전속도에 비례하는 점성 마찰의 크기가 거의 나타나지 않았다.

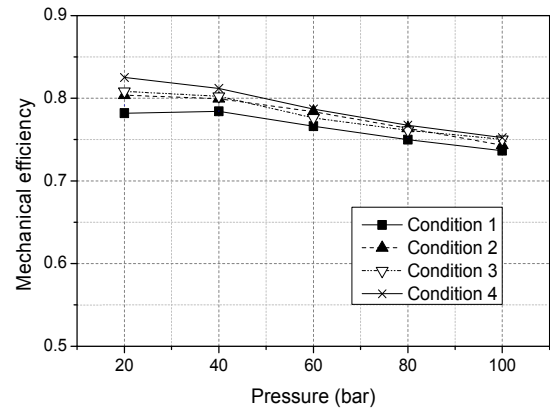
각 실험 조건별로 50rpm, 100rpm 및 200rpm에서 펌프의 출구 압력을 100bar까지 증가시키며 체적 효율, 기계효율 및 전 효율을 측정한 결과는 다음과 같다. 50rpm에서는 펌프의 송출 유량이 작은 반면, 피스톤 슈와 밸브 플레이트 틈새에서의 누설 유량이 갖는 비중이 크므로 Fig. 7에서와 같이 부하 압력이 높을수록 체적 효율이 급격히 감소하였다. 체적 효율은 펌프의 회전속도가 200rpm이상이 되면 최소 95%에 달하였다. 체적효율의 측면에서는 DLC 코팅의 효과를 조건별로 구분하기 어려웠다.

기계효율도 펌프의 회전속도가 높을수록 개선되는 반면, 50rpm에서는 고체 마찰 성분이 크므로 실린더 압력이 높을수록 효율이 나빠졌고 100rpm 이상에서는 40bar 이하에서 효율이 더 떨어지는 경향이 나타났다. DLC 코팅이 기계효율에 미치는 효과는 100rpm의 경우에 실험 조건 4에서는 실험 조건 1에 비해 최대 5%, 실험 조건 2에서는 2.5%, 실험 조건 3에서는 4% 정도의 효율 개선 효과가 나타났다. 이러한 DLC 코팅에 의한 효율 개선 효과는 Fig. 9의 전 효율 측정 결과에도 그대로 반영되어 나타나며, 특기할 만한 사항은 100rpm이하의 저속에서는 기계효율이 85%를 넘지 못하고 체적효율도 나빠기 때문에 코팅 효과 없이는 전 효율이 80%를 넘지 못하였다.

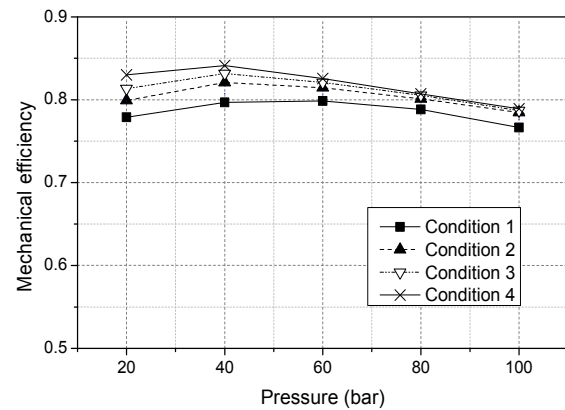
경제적인 측면에서 경사판과 볼 조인트 둘 중의 하나에 DLC 코팅을 적용한다면 Fig. 8과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 경사판을 선택하는 것이 유리하며 이것은 피스톤 슈의 마모를 억제하는 측면에서도 큰 장점이 있다.¹³⁾

피스톤 슈에 대한 실험 결과와 달리, 펌프의 효율 측정 결과에서는 200rpm에서도 DLC 코팅에

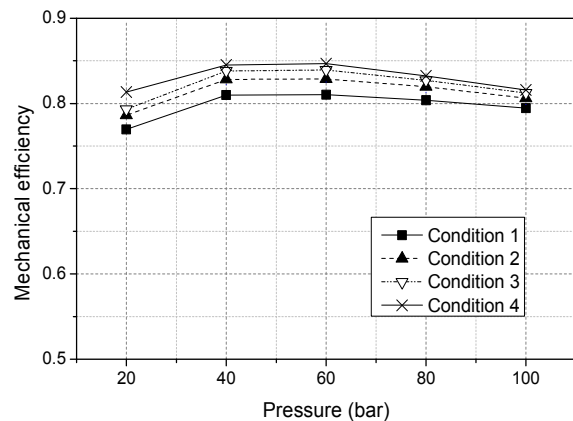
의한 마찰 토크의 감소 현상이 나타나는 것은 피스톤 슈 실험 장치에서 설정한 실린더 배럴과 경사판 사이의 중심거리가 실제 펌프에서의 거리보다 짧게 설정됨에 따라 피스톤에 작용하는 마찰력이 더 작았었기 때문으로 판단된다. 이 중심 거리는 피스톤에 발생하는 축력의 크기에 지대한 영향을 미친다.



(a) 50rpm

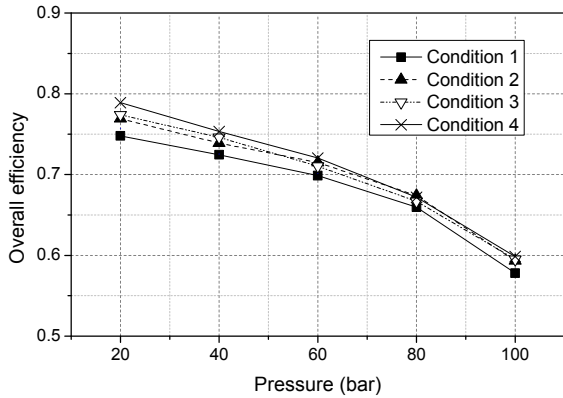


(b) 100rpm

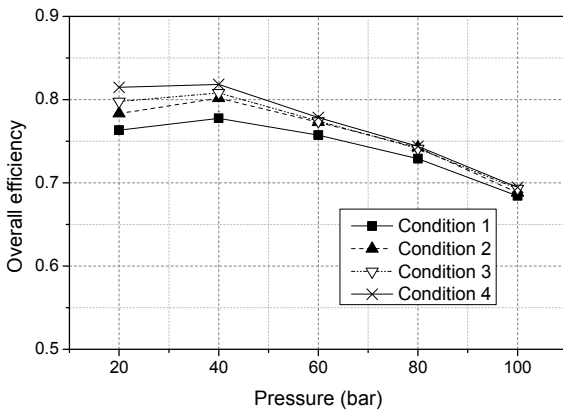


(c) 200rpm

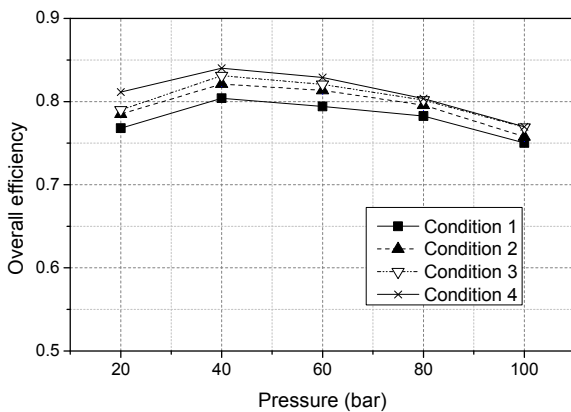
Fig. 8 Mechanical efficiency of the test pump



(a) 50rpm



(b) 100rpm



(c) 200rpm

Fig. 9 Overall efficiency of the test pump

5. 결 론

본 연구에서는 사판식 피스톤 펌프의 경사판과 피스톤 볼 조인트에 DLC 박막을 코팅하여 100rpm 미만의 저속 영역에서 피스톤 슈 정압 베어링의 마찰력과 누설 유량이 크게 개선됨을 실험적으로 확인하였다. 이러한 개선 효과는 펌프의 체적 효율에는 큰 영향을 주지 않은 반면, 기계효율에는 최대 5% 정도

의 개선 효과를 나타냈다. 펌프의 전 효율 개선에는 볼 조인트보다 경사판의 DLC 코팅 효과가 더 크게 나타났다.

향후 계획으로서 경사판의 DLC 박막에 대한 내구성을 가혹한 작동 조건에서 확인하고자 한다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 중견연구자지원사업(과제번호 NRF 2011-0015640)의 지원을 받아 수행된 것임.

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) 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.
- 5) R. E. Johnson and N. D. Manning, "Translating Circular Thrust Bearings", J. Fluid Mech., Vol. 530, pp.197-212, 2005.
- 6) A. Schenk and M. Ivantysynova, "An Investigation of the Impact of Elastohydrodynamic Deformation on Power Loss in the Slipper Swash Plate Interface", Proc. 8th JFPS Int. Symposium on Fluid Power, pp.228-234, 2011.
- 7) I.S. Cho, "Theoretical Analysis of the Slipper Hydrostatic Bearings Shape in the Swash

- Plate Type Axial Piston Pump, J. Korean Soc. Fluid Power Constr. Equip., Vol.10, No.1. pp.14-20, 2013.
- 8) O. Böinghoff, "Untersuchen zum Reibungsverhalten der Gleitschuhe in Schrägscheiben-Axial-kolbenmaschinen", VDI-Forschungsheft, VDI-Verlag, Düsseldorf, Vol. 584, 1977.
 - 9) 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.
 - 10) Y. Inaguma, "Reduction of Friction Torque in Vane Pumps by Using Physical Vapour Deposition-coated Vane", Proc. IMechE Vol.224 Part C: J. Mechanical Engineering Science, pp.2449-2458, 2010.
 - 11) 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.
 - 12) Creating Nano Technologies Inc., www.creating-nanotech.com.
 - 13) Y. S. Hong, Y. C. Kwon, C. H. Kim, S. L. Lee, B. K. Kim, J. S. Moon and J. H. Kim, "Performance Improvement of the Hydrostatic Piston Shoe Bearing of an EHA-Piston Pump under Boundary Friction Conditions", J. Korean Soc. Fluid Power Constr. Equip., Vol.11, No.2. pp.30-35, 2014.