

사판식 유압 피스톤 펌프용 Slipper Bearing내의 유동해석

박태조[†] · 유재찬*

경상대학교 기계항공공학부 · 공학연구원, *두산모트롤(주)

Flow Analysis in a Slipper Bearing for Swash Plate Type Axial Piston Pump

Tae-Jo Park[†] and Jae-Chan Yoo*

School of Mechanical & Aerospace Engineering, ERI, Gyeongsang National University

*Doosan Mottrol Co., Ltd.

(Received November 4, 2008; Revised November 28, 2008; Accepted November 28, 2008)

Abstract – In this paper, a CFD (Computational fluid dynamics) code, FLUENT is adopted to investigate accurate flow characteristics for a slipper bearing which is used swash plate type hydraulic axial piston pump. Static pressure and velocity distributions, and velocity vectors are plotted for different film thickness and slipper rotational velocity. In recess region, there exists a doughnut shaped vortex ring. The static pressure distributions are non-uniform and the flow fields are highly asymmetrical under bearing rotation. Therefore the numerical method adopted in this paper can be use in design of hydrostatic components and further studies are required.

Key words – axial piston pump, swash plate, slipper bearing, orifice, recess, CFD

1. 서 론

사판식(Swash plate type) 유압 피스톤 펌프는 사축식(Bent-axis type)에 비하여 구조가 단순하고 설치면적이 작게 소요되는 등의 장점으로 인하여 고압의 대유량이 요구되는 유압장치에 널리 사용되고 있다. 이때, 경사진 원판(Swash plate) 상으로 실린더 블록이 쉽게 미끄러지게 하는 슬리퍼 베어링(Slipper bearing)은 펌프의 가장 중요한 구성부품중의 하나로 오리피스(Orifice)를 통하여 가압된 소량의 유압유를 리세스(Recess) 내부로 공급시켜 원활하게 윤활이 되도록 한다. 이 결과, 슬리퍼 베어링은 리세스에 공급되는 유압유의 압력에 의한 정압 베어링(Hydrostatic bearing) 기능과 함께 운전시에 슬리퍼 랜드(Land)부에서 유압유의 윤활작용으로 유체압력을 발생시키는 동압 베어링(Hydrodynamic bearing) 기능을 동시에 하게 된다. 따

라서, 베어링의 하중지지능력과 누설유량(급유량) 등을 정확하게 구하기 위해서는 리세스 내에서의 유압유의 유동특성과 랜드부에서의 윤활특성을 동시에 해석해야만 된다. 하지만 크기가 극히 작은 랜드부의 유막두께에 비하여 리세스 깊이는 아주 크기 때문에 이곳에서는 레이놀즈 방정식을 적용하기가 어려운 실정이다. 따라서, 사판식 유압 피스톤 펌프용 슬리퍼 베어링의 윤활성능을 정확하게 예측하기 위해서는 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 모두 적용해야 되며, 이러한 경우에 전산유체역학(Computational fluid dynamics: CFD) 해석방법을 사용하는 것이 보다 현실적이다.

Koc & Hooke[1,2]는 오리피스 크기, 리세스의 반경 및 두께 변화에 따른 고압 피스톤 펌프용 슬리퍼 베어링의 특성을 실험적으로 조사하였다. Manring 등[3]은 슬리퍼 베어링을 지지하는 소켓(Socket)의 형상에 따른 소켓 내부의 압력측정결과를 사용하여 이곳에서의 유막두께를 이론적으로 추정하였다. Huanlong 등[4]은 수압용 피스톤 펌프에 적용하기 위한 새로운 형태의 슬리

[†]주저자 · 책임저자 : tjpark@gnu.ac.kr

퍼 베어링을 제안하고 CFD 해석결과를 제시하였다. 한편, Dzodzo 등[5]은 저어닐 베어링용 정압 베어링에서 리세스와 랜드부 형상, 축의 회전속도 등의 변화에 따른 압력분포와 유동특성을 수치해석적으로 조사하였으며, Chen & He[6]과 Mitidieri 등[7]은 각각 공기베어링과 포켓(Pocket)이 있는 패드(Pad) 베어링에서 리세스 형상에 따른 유희특성을 CFD 해석으로 구하였다. 이상에서 고찰결과와 같이 사판식 유압 피스톤 펌프용 슬리퍼 베어링의 리세스 내에서의 유압유 유동에 관련된 연구는 극히 미흡한 실정이다.

이에 본 논문에서는 사판식 유압 피스톤 펌프의 유희성능향상을 위한 설계자료를 확립하기 위하여 열·유체해석용 CFD 프로그램인 FLUENT[8]를 사용하여 랜드부 유막두께와 베어링의 운동에 따른 리세스 내부의 유동특성을 상세하게 조사하고자 한다.

2. 해석 방법

2-1. 지배방정식

본 논문에서는 사판식 유압 피스톤 펌프용 슬리퍼 베어링의 리세스 내에서의 유동특성을 조사하기 위하여 유압유의 유동을 3차원 비압축성, 정상상태, 층류유동으로 가정하였다. 이 경우, 유동을 지배하는 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식은 각각 다음의 식 (1)과 식 (2)으로 나타낼 수 있다.

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

여기서, p 는 압력, ρ 와 μ 는 유압유의 밀도와 점도이고 \mathbf{v} 는 속도벡터이다.

2-2. 해석모델

Fig. 1은 해석에 사용한 피스톤에 조립된 상태의 슬리퍼 베어링을 나타낸 그림으로 슬리퍼의 회전운동을 고려한 해석을 위하여 3D로 모델링하였다.

Fig. 2는 FLUENT의 부속전처리 프로그램인 Gambit을 이용하여 구성된 수치해석용 격자계(Grid)를 나타낸 것으로 오리피스스를 포함한 전체격자수는 간극의 크기와 해석모델에 따라 350,000~520,000개 정도이다. 한편, 슬리퍼 베어링의 최대회전속도는 항공기용 펌프인 적용조건을 고려하여 10,000 rpm으로 설정하였다.

Fig. 3은 해석대상인 슬리퍼 베어링의 크기를 나타낸 그림으로 R_L , R_R 및 R_O 는 순서대로 리세스 반경,

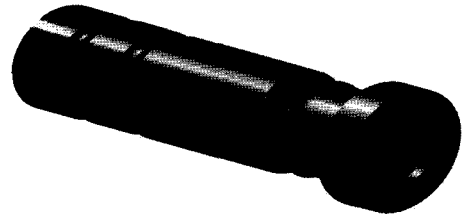


Fig. 1. 3D model of piston and slipper bearing.

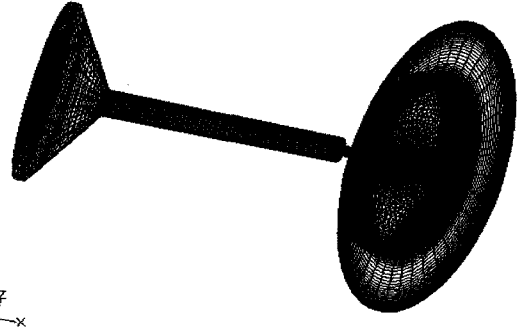


Fig. 2. Grid system used in numerical analysis.

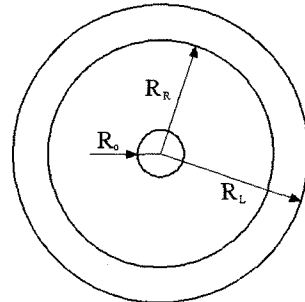


Fig. 3. Slipper bearing geometry.

Table 1. Slipper bearing dimension

	Dimension, mm
R_O	0.33
R_R	5.96
R_L	4.87

랜드부 반경 및 오리피스 반경이며, 이들의 치수는 Table 1에 나타내었다. 한편, 해석에 사용된 유압유의 밀도와 점도는 각각 875 kg/m^3 , 0.0228 kg/m-s 이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 슬리퍼 랜드부와 사판 사이의 유막두께가

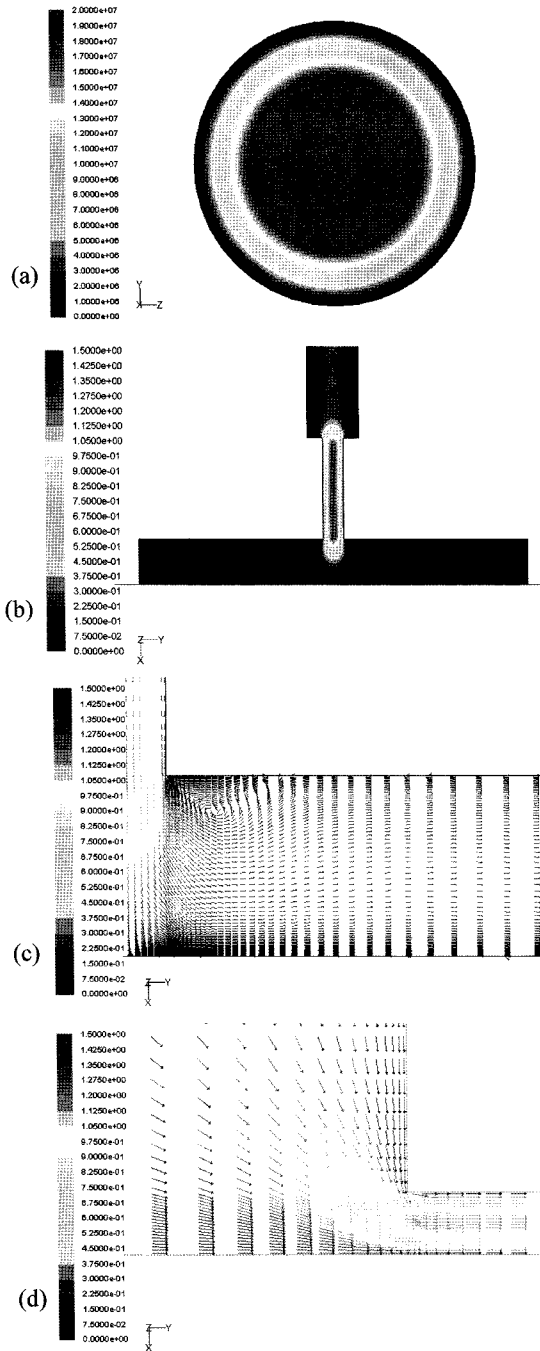


Fig. 4. Flow characteristics for film thickness is 4 μm . (a) Static pressure distribution, (b) Velocity distribution, (c) Velocity vector near orifice outlet region, (d) Velocity vector near land inlet region.

4 μm 인 경우에 정지상태인 슬리퍼의 리세스내에서의 유동특성을 나타낸 결과이다. 정압(Static pressure) 분

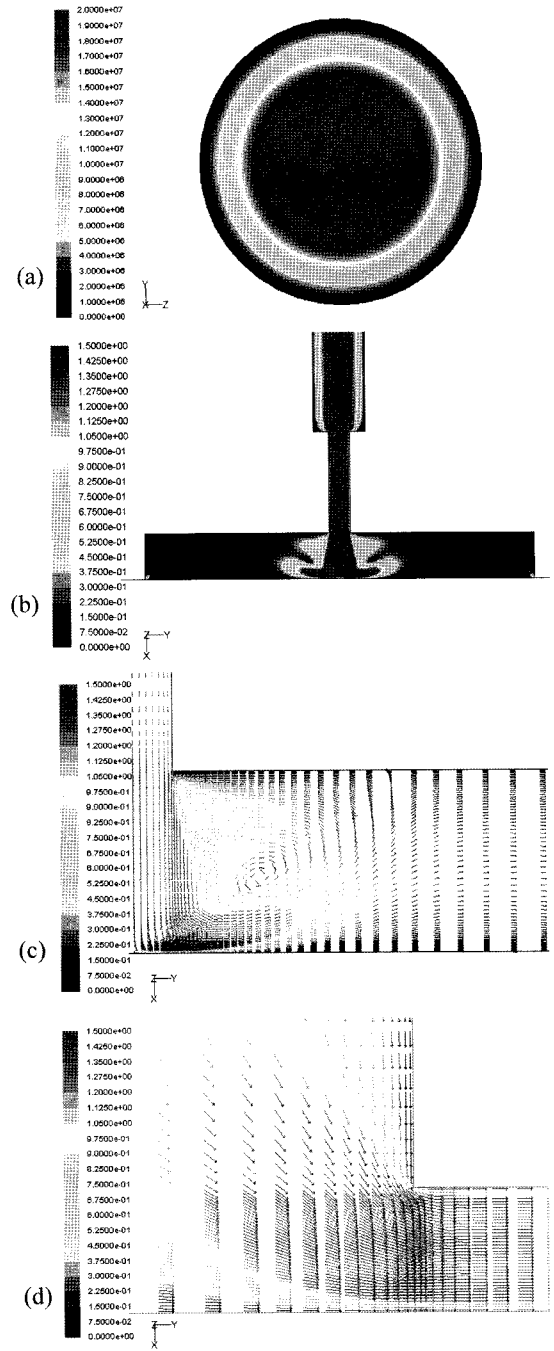


Fig. 5. Flow characteristics for film thickness is 8 μm . (a) Static pressure distribution, (b) Velocity distribution, (c) Velocity vector near orifice outlet region, (d) Velocity vector near land inlet region.

포는 리세스 내에서는 거의 균일하지만 랜드부의 간극을 지나면서 급격하게 감소함을 Fig. 4(a)에서 알 수

있다. Fig. 4(b)는 전체속도분포를 나타낸 그림으로 직경이 작은 오리피스를 통과하면서 아주 빨라진 유체가

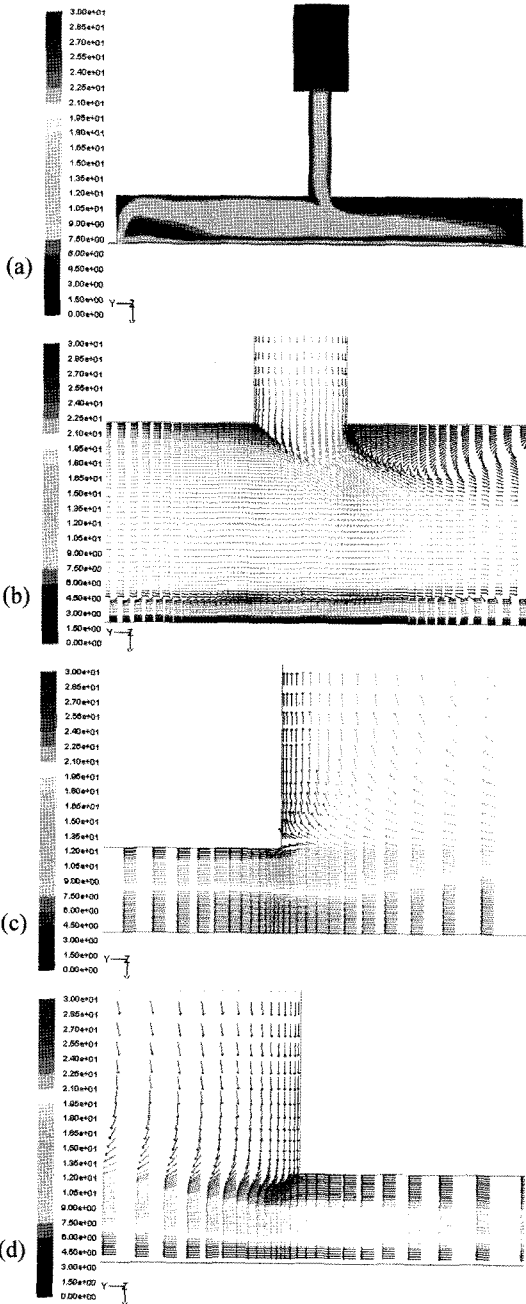


Fig. 6. Flow characteristics for rotating slipper bearing. (a) Velocity distribution, (b) Velocity vector near orifice outlet region, (c) Velocity vector near left hand side of orifice outlet region, (d) Velocity vector near right hand side of orifice outlet region

상대적으로 넓은 리세스에서 급격하게 느려진다. 한편, Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)는 리세스 내의 오리피스 출구부근과 랜드 입구부근에서의 속도벡터를 각각 확대하여 나타낸 그림이다. 오리피스 출구 부근에서는 유속이 느려지면서 도넛(Doughnut) 형상인 와류(Vortex ring)가 발생하며, 랜드 입구부근에서는 유속이 급격하게 빨라지고 있다.

Fig. 5에는 앞의 Fig. 4에서 보다 유막두께가 2배인 8 μm인 경우에 대한 유동특성을 동일한 순서로 나타내었다. Fig. 4에서 보다 오리피스를 통과하는 유량(누설유량)은 8배나 증가하므로 오리피스에서의 유속은 크게 빨라져서 Fig. 5(b)에 나타낸 것과 같이 유압유가 사판면에 강하게 분사되고 있다. 이에 따라 와류는 한 층 크고 강할 뿐만 아니라 이의 중심위치는 사판면 쪽으로 접근하여 형성되고 있다. 또한, 유량증가에 따라서 랜드 입구부에서의 유속도 더욱 빨라지고 있다.

Fig. 6에는 유막두께가 8 μm인 상태에서 사판이 10,000 rpm으로 회전하는 경우(그림에서는 사판이 왼쪽으로 운동)에 대한 유동특성을 나타내었다. 이때, 사판의 회전축중심에서 슬리퍼 베어링의 오리피스 중심까지의 거리는 30.31 mm이다. 베어링이 사판축을 중심으로 회전운동을 할 경우에는 Fig. 5(a)에서와 달리 리세스 내에서의 유압유 유동은 Fig. 6(a)와 (b)에 나타낸 속도분포에서 관찰할 수 있는 것과 같이 아주 복잡하다. 즉, 압력차이로 오리피스를 통과한 유체에 의한 유동(Poiseuille flow)과 사판의 운동에 의한 점성유동(Couette flow) 및 리세스의 형상에 의해서 전체속도분포가 결정된다. 특히, 슬리퍼 베어링이 고속으로 운전하는 경우에는 Couette 유동이 간극에서는 지배적

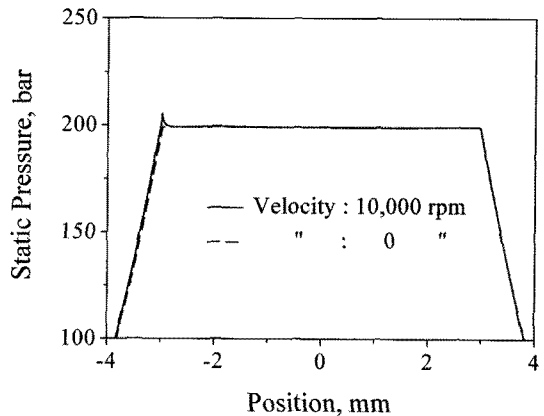


Fig. 7. Static pressure distribution across slipper bearing.

이다. 이 결과, 운동방향측 랜드 입구부 부근에서 간극을 통과하지 못한 유체는 리세스 안쪽으로 순환되지만 (Fig. 6(c)) 이와 반대쪽 랜드부에서는 베어링 바깥쪽에 있는 유압유가 리세스 내부로 역류하고 있다(Fig. 6(d)). 따라서, 리세스 내에서의 이러한 유동변화는 상당한 정도의 압력차이를 유발시킬 것으로 예상된다.

Fig. 7에는 슬리퍼 베어링이 고속으로 회전하는 경우와 정지상태인 경우에 대한 리세스 중심에서 랜드부 끝까지의 정압분포를 비교하여 나타내었다. 리세스 내에서의 압력분포는 서로 거의 비슷하지만 사판이 운동할 경우에는 Fig. 6(c)에서 고찰한 이유로 랜드부 입구에서 압력이 상승하고 있다. 이것은 사판의 운동에 의해서 랜드부로 끌려 들어가던 유압유가 급격한 단면감소에 의해서 유체의 동압이 정압으로 변환되면서 발생하는 일종의 선단압력(Inlet pressure build-up)이다. 따라서, 슬리퍼 베어링이 운전되는 경우에는 리세스 내의 압력을 일정하다고 가정한 기존의 정압베어링 해석 결과와는 궁극적으로 유효특성에서 큰 차이를 보일 것으로 예측된다. 즉, 리세스 내부에서의 국부적인 압력차이는 슬리퍼 베어링에 틸팅(Tilting) 모멘트로 작용하므로 베어링의 유효특성은 크게 변화할 것이다. 또한, 이와 같은 슬리퍼 베어링부의 유효특성은 피스톤과 실린더 사이에서의 유효특성[9,10]에도 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서, 사판식 유압 피스톤 펌프에 사용되는 슬리퍼 베어링에서는 리세스 내에서의 유압유 유동에 의한 영향을 고려한 유효해석이 필수적으로 요구된다.

이상의 결과에서, 슬리퍼 베어링의 리세스 내부에서의 유동특성은 랜드부와 사판사이의 유막의 크기와 사판의 운동에 따라서 크게 변화하였다. 즉, 유막의 크기가 커질수록 증가한 오리피스스의 분출속도는 리세스 내에서 발생하는 와류의 중심위치를 사판쪽으로 이동시켰다. 특히, 사판이 고속운동할 경우에는 리세스 내부의 압력분포가 균일하지 않는다는 결과를 처음으로 제시하였으며, 이러한 결과는 사판식 유압 피스톤 펌프용 슬리퍼 베어링의 하중지지능력과 이론유량 등의 유효특성에 영향을 미치게 될 것이다. 따라서, 보다 정확한 설계자료의 도출을 위해서 체계적인 추가연구가 요구된다.

4. 결 론

본 논문에서는 사판식 유압 피스톤 펌프의 슬리퍼

베어링 내에서의 유동특성을 열·유체해석 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하여 상세하게 해석하였다. 사판과 랜드부 사이의 유막 크기와 사판의 회전속도의 변화에 따른 리세스와 랜드부에서의 속도 및 압력 분포를 조사하였다. 이 결과, 유막두께의 크기와 슬리퍼 베어링의 운동에 따라서 리세스 내부유동에는 상당한 차이를 나타내었다. 유막의 크기가 커질수록 리세스 내에서 발생하는 와류의 중심위치가 사판쪽으로 이동하였다. 특히, 사판이 운동할 경우에는 리세스 내부의 압력분포가 동일하지 않다는 결과를 처음으로 제시하였다. 따라서, 본 논문에서 사용한 해석방법은 슬리퍼 베어링은 물론 각종 유압부품의 설계에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대되며, 다양한 설계변수에 대한 추가연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2단계 BK21사업과 두산모트롤(주)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Koc, E. and Hooke, C. J., "Investigation into the Effects of Orifice Size, Offset and Overclamp Ratio on the Lubrication of Slipper Bearing", *Tribology Int.*, Vol. 29, pp. 299-305, 1996.
2. Koc, E. and Hooke, C. J., "Considerations in the Design of Partially Hydrostatic Slipper Bearings", *Tribology Int.*, Vol. 30, pp. 815-823, 1997.
3. Dzodzo, M., Braun, M. J. and Hendricks, R. C., "Pressure and Flow Characteristics in a Shallow Hydrostatic Pocket with Rounded Pocket/Land Joints", *Tribology Int.*, Vol. 29, pp. 69-76, 1999.
4. Manring, N. D., Wray, C. L. and Dong, Z., "Experimental Studies on the Performance of Slipper Bearings Within Axial-Piston Pumps", *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol. 126, pp. 511-518, 2004.
5. Huanlong, L., Jian, K., Guozhi, W., and Lanying, Y., "Research on the Lubrication Characteristics of Water Hydraulic Slipper Friction Pairs", *Proc. IMechE, J. of Engineering Tribology*, Vol. 220, pp. 1559-1567, 2006.
6. Chen, X. D. and He, X. M., "The Effect of the Recess Shape on Performance Analysis of the Gas-Lubricated Bearing in Optical Lithography", *Tribology Int.*, Vol. 39, pp. 1336-1341, 2006.
7. Brajdic-Mitidieri, P., Gosman, A. D., Ioannides, E. and Spides, H. A., "CFD Analysis of a Low Friction

- Pocketed Pad Bearing”, *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol. 127, pp. 803-812, 2005.
8. FLUENT, *FLUENT 6.0 Manual*, 2002.
 9. 박태조, 전병수, “유압 피스톤 펌프의 피스톤과 실린더 사이의 윤활해석, 제1보 : 피스톤 형상에 의한 영향”, *한국윤활학회지*, Vol. 14, No. 1, pp. 64-69, 1998.
 10. 박태조, “유압 피스톤 펌프의 피스톤과 실린더 사이의 윤활해석, 제2보 : 피스톤 왕복운동의 영향”, *한국윤활학회지*, Vol. 17, No. 6, pp. 435-440, 2001.