

정압베어링에서 입구압력 및 틈새간격 변화에 따른 누설량의 상관관계에 관한 연구

Study on the Correlation of Leakage by the Variation of Inlet Pressure and Clearance in Hydrostatic Bearing

윤충국*† · 배강열** · 전진성***
Chung-Kug Yun*† , Kang-Youl Bae** and Jin-Seong Jeoun***

(Received 22 July 2016, Revision received 17 November 2016, Accepted 17 November 2016)

Abstract: This paper is the numerical study on the correlation of leakage by the variation of inlet pressure and clearance in hydrostatic bearing. The main goal of this study is to apply to the design of hydro system the results that the pocket pressure and the leakage rate according to the inlet pressure and the clearance between piston and cylinder tube. Because the hydrostatic bearing in hydraulic cylinder has the narrow rectangular channel between piston and cylinder tube, so to verify the numerical scheme, it has been compared with the experimental results of Brackbill and Kandlikar. The pressure data of numerical results inside narrow rectangular channel correlate was showed a good agreement with experimental results, thereby the numerical scheme was applied to the real model that is a hydraulic cylinder with the hydrostatic bearing. In conclusion, the pressure differences between inlet and pocket were shown within 3%. Leakage rates were showed rapidly increased pattern between about 4.5 and 6.7 times because the section area to calculate the leakage rates were proportioned to a square of diameter. The correlation equation was calculated among the inlet pressure, the clearance and the leakage rate by using the linear regression.

Key Words : Hydraulic Cylinder, Hydrostatic Bearing, Narrow Rectangular Channel, Leakage Rate

1. 서 론

유압실린더(Hydraulic cylinder or actuator)는 고 점성의 유체를 이용하여 대형 기계 시스템의 높은 동력 및 정밀제어, 증기(Steam)를 동력으로 사용하여 전기를 생산하는 발전시스템에 증기를 제

어하기 위하여 사용되고 있다.^{1,2,6)}

본 연구에서 유압실린더에 적용된 정압베어링 시스템은 피스톤과 튜브사이의 좁은 채널사이로 유체로 공급하여 유압에 의하여 피스톤이 튜브 내부에서 마찰 없이 부상하는 것이다. 유압실린더를 정압베어링 기술을 적용하여 마찰 없이 부상

*† 윤충국(교신저자) : 경진고등학교
E-mail : yck6552@hanmail.net, Tel : 055-746-1522
**배강열, 전진성 : (주)대명지이엔티

*† Chung-Kug Yun(corresponding author) : GyeongJin
Highschool.
E-mail : yck6552@hanmail.net, Tel : 055-746-1522
**Kang-Youl Bae, Jin-Seong Jeoun : Dae Myung GENT
Co., Ltd.

시키기 위해서는 피스톤과 튜브 사이에 유체가 일정하게 지속적으로 흐르는 것이 중요하다. 유압 실린더에서는 정압베어링형성을 위하여 공급되는 유량만큼 유압손실이 발생하기 때문에 유압공급 시스템의 용량결정을 위하여 입구압력 및 틈새간격 변화에 따른 누설량 예측이 매우 중요하다. Islam^{3,4)}은 마이크로 채널(Micro channel)의 중형비의 영향에 대한 연구를 진행하였고 Brackbill⁵⁾은 마이크로채널에서 벽면거칠기 변화에 따른 채널 내부의 압력 및 마찰계수에 관한 실험적 연구를 진행하였다. 현재 미소채널(Micro channel)에 대한 실험 및 수치해석적 연구는 확대 및 축소부가 없는 경우에 대한 연구가 진행되었으며, 학문적인 결과 도출에 목적을 두고 있다.

본 연구의 목적은 확대 및 축소부를 가지는 유압실린더의 정압베어링 기술을 실제 산업현장에 적용하기 위하여 미소채널에 대한 수치해석적 연구를 진행하여 입구압력 및 틈새간격 변화에 따른 누설량 및 포켓압력을 도출하여 유압시스템 설계에 반영하는 것이다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 기법 검증

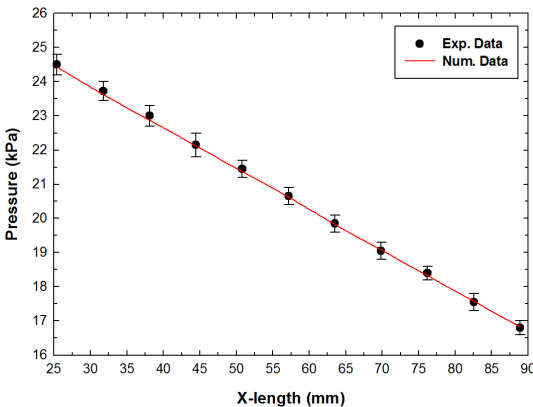


Fig. 1 Comparison of pressure data between experimental and numerical results

본 연구에서 수치해석을 위한 정압베어링의 경

우 좁은 사각 채널을 가지고 있기 때문에 Brackbill과 Kanglikar⁵⁾의 실험결과와 수치해석기법에 대한 비교검증을 실시하였고, Fig. 1과 같이 이전 연구 결과⁶⁾에서 검증하였다.

2.2 지배방정식

다음은 해석에서 사용된 지배방정식이다. 정상 유동, 비압축성 유동으로 가정하여 운동량 방정식을 적용하였고, 점성소산 및 열전달은 고려하지 않기 때문에 에너지 방정식은 적용하지 않았다.

연속방정식(Continuity equation)

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식(Momentum equation)

X 방향 :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\rho} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

Y 방향 :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial y} \frac{1}{\rho} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

Z 방향 :

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} \frac{1}{\rho} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

여기에서 ρ 는 유체의 밀도, ν 는 동점성계수이며, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 속도 성분이다. 지배방정식의 해법을 위해서 ANSYS-FLUENT에서 제공하는 공간차분은 2차 정확도의 상류도식(Second order upwind)을 사용하였다. 수렴판정 조건은 운동량 및 연속방정식의 잔차(Residual)가 10^{-3} 이하일 때로 지정하였다.

2.3 해석모델 및 경계조건

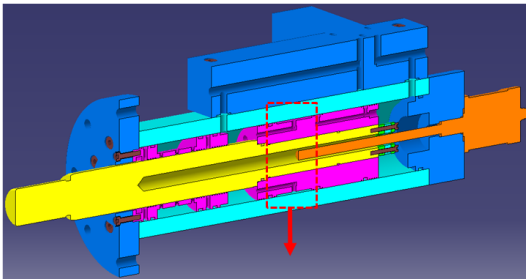
Fig. 2는 유압실린더와 정압베어링의 수치해석 모델을 나타낸 것이다. (a)에서 붉은 사각박스로 표시된 부분에 (b)와 같이 정압베어링 형성을 위한 피스톤으로 구성되며, (c)와 같이 피스톤과 튜

브사이에 포켓(Pocket)을 가지고 있으며, 좁은 채널을 통하여 유체의 입출구 압력차에 의하여 누설량이 결정된다.

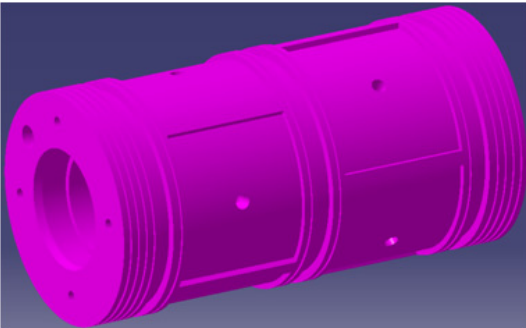
또한 출구압력이 낮아지게 되면 외부로 누설되는 유체의 누설량을 감소시키기 때문에 압력감소를 위한 라비린스(Labyrinth)를 적용하였다.

Table 1 Variables for numerical analysis

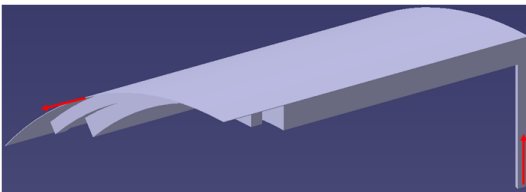
Variable	Value	Unit
Inlet pressure	25~200	bar
Outlet pressure	0	bar
Clearance	0.01~0.05	mm



(a) Hydraulic cylinder



(b) Piston



(c) Fluid model

Fig. 2 Numerical Model of hydrostatic bearing

Fig. 2의 (c)에서 오른쪽 하부에서 유체가 공급되고, 왼쪽으로 유체가 빠져나가게 되며 입구 및 출구는 압력조건을 적용하였다. 나머지 벽면은 전체 영역에서 1/16을 해석영역으로 설정하였기 때문에 대칭(Symmetry)조건을 적용하였다

유압실린더를 일반산업체보다 제약조건이 많은 발전소 적용환경을 고려하여 기존 발전소에서 적용중인 작동유체 ISO VG 46 Oli, 사용온도 55℃에 대한 물성치(밀도 852.1 kg/m³, 점성계수 0.01935 kg/m·s)를 사용하였고, 변수는 Table1과 같다.

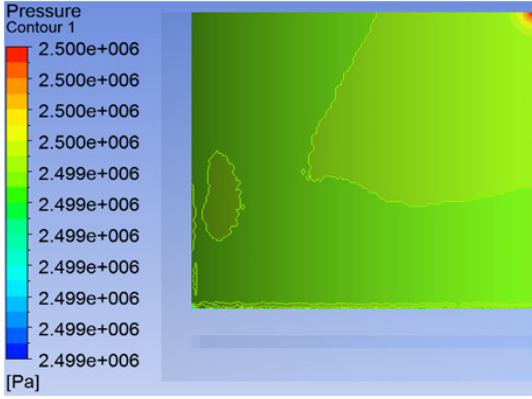
3. 수치해석 결과

Fig. 3과 4는 입구압력 및 틈새간격에 따른 포켓벽면의 압력분포를 나타낸 것이다. 압력분포는 유동이 공급되는 입구에서 높고 출구 쪽으로 갈수록 낮은 분포를 보여주고 있다. 틈새간격이 0.01 mm인 경우 고점성으로 인하여 형성된 유막 때문에 누설량이 매우 적어 포켓벽면의 압력값이 거의 동일하게 나타나고 있다.

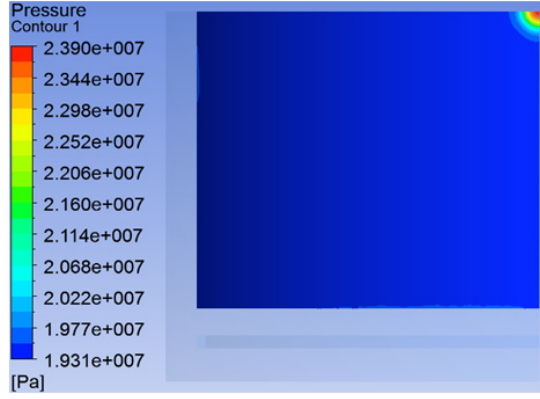
따라서 본 연구에서 적용된 틈새간격(0.01~0.05 mm)에 대해서는 입구압력에 대한 포켓압력의 차압이 거의 발생하지 않는다.

Fig. 5와 6은 입구압력 및 틈새간격에 따른 유동장 내부의 속도분포를 나타낸 것이다. 입구에서 공급되는 압력이 커질수록 유동장 내부에 큰 속도장이 형성되기 때문에 누설량도 증가하게 된다. 출구영역은 내부의 압력을 감소하기 위하여 가공된 라비린스(Labyrinth) 홈에 의하여 빠른 속도분포를 보여주고 있다.

Fig. 7은 입구압력 및 틈새간격에 따른 포켓 압력을 나타낸 것이다. 입구압력에 대한 포켓 압력은 틈새간격이 매우 좁기 때문에 차압(최대 약 3%)이 거의 발생하지 않고 있으며, 틈새간격의 변화에 대해서도 변화량(최대 약 3%)이 매우 적다. 상기의 결과를 통하여 현재에 제시된 틈새간격의 범위에서는 입구압력에 대한 포켓 압력이 거의 동일한 결과를 나타내고 있다.

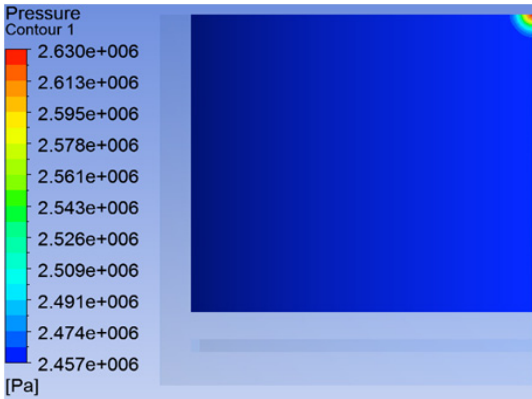


(a) Clearance : 0.01 mm



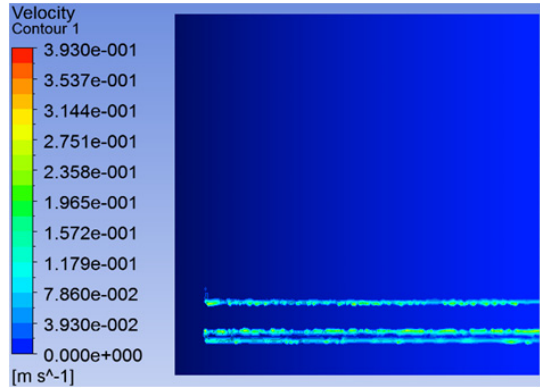
(b) Clearance : 0.05 mm

Fig. 4 Pressure contour in hydro-pocket according to clearance : inlet pressure 200 bar



(b) Clearance : 0.05 mm

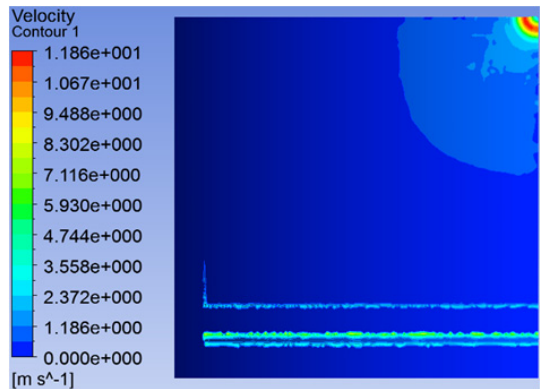
Fig. 3 Pressure contour in hydro-pocket according to clearance : inlet pressure 25 bar



(a) Clearance : 0.01 mm

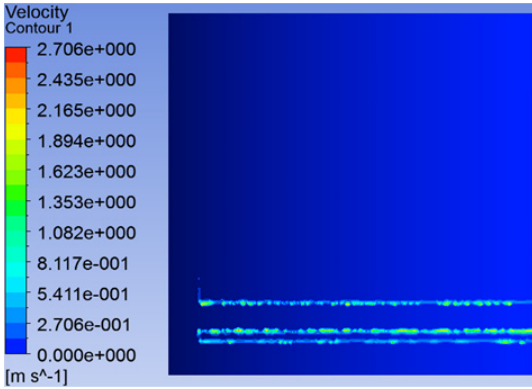


(a) Clearance : 0.01 mm

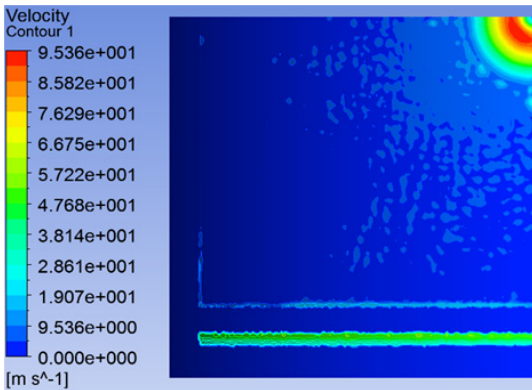


(b) Clearance : 0.05 mm

Fig. 5 Velocity contour in hydro-pocket according to clearance : inlet pressure 25 bar



(a) Clearance : 0.01 mm



(b) Clearance : 0.05 mm

Fig. 6 Velocity contour in hydro-pocket according to clearance : inlet pressure 200 bar

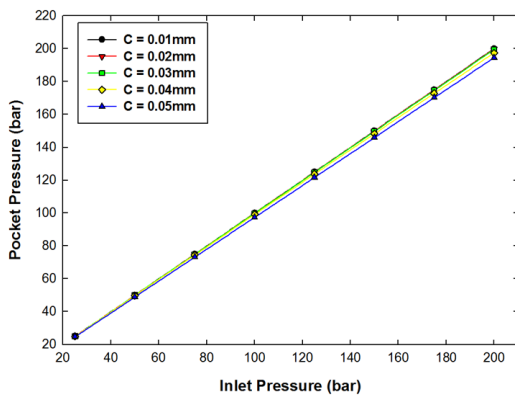


Fig. 7 Pocket pressure according to inlet pressure and clearance

그러나 이러한 결과는 유체의 종류 및 특성(밀도, 점성계수 등)이 달라질 경우에는 별도의 연구가 진행되어야 할 것이다.

Fig. 8은 입구압력 및 틈새간격에 따른 누설량을 나타낸 것이다. 입구압력에 대한 누설량은 동일한 틈새간격에 대해서 틈새간격이 0.01 mm일 경우에는 누설량의 변화가 약 4.5배, 0.05 mm일 경우에는 약 6.7배로 누설량의 변화가 매우 크게 발생한다. 틈새간격에 따른 누설량은 유속과 단면적에 의하여 결정되며, 틈새간격이 커질수록 단면적은 직경의 제곱에 비례하여 증가하기 때문에 기울기가 커지는 것이다.

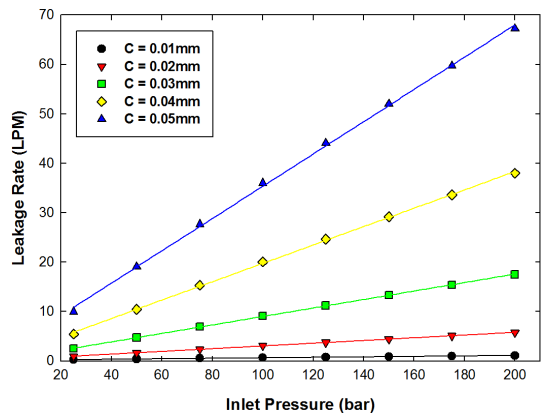


Fig. 8 Leakage rate according to inlet pressure and clearance

Fig. 8의 결과에서 입구압력, 틈새간격, 누설량과는 선형적인 상관관계가 있음을 확인하였고, 선형보간을 통하여 식 (3)과 같은 상관식을 도출할 수 있었다. 그리고 상관식에 대한 계수는 Table 2에 나타내었다.

$$Y = aX + b \quad (3)$$

여기에서 Y 는 누설량(Leakage rate), X 는 입구압력(Inlet pressure), a 와 b 는 계수를 나타낸다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 20131520400070)

References

1. J. W. Jung, H. S. Jeon and Y. S. Bae, 2001, "A Motion control of Hydraulic System using variable orifice", Korea ADAMS User Conference, Vol. 11, No. 8-9, pp. 1-8.
2. Korea Research Council for Industrial Science and Technology, 2013, "Development of intelligent servo actuator for steam control of nuclear/thermal power plants", Korea Institute of Machinery and Materials.
3. M. T. Islam and Y. W. Lee, 2007, "Effect of Aspect Ratio On Gas Microchannel Flow", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 16-21.
4. M. T. Islam and Y. W. Lee, 2009, "Influence of Aspect Ratio on Friction Characteristics in Rectangular Gas Microchannel Flow", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 13, No. 2, pp. 18-29.
5. T. P. Brackbill and S. G. Kandlikar, 2007, "Effect of Sawtooth Roughness on Pressure Drop and Turbulent Transition in Microchannels", Heat Transfer Engineering, Vol. 28, No. 8-9, pp. 662-669.
6. K. Y. Bae and J. S. Jeoun, 2015, "Study on the Hydraulic Cylinder Flow Analysis of Orifice Type", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 54-59.

Table 2 Coefficient for numerical analysis

Clearance	Coefficient	
	a	b
0.01 mm	0.0048	0.1491
0.02 mm	0.0275	0.2758
0.03 mm	0.0856	0.4528
0.04 mm	0.1858	1.1720
0.05 mm	0.3265	2.7177
25 bar ≤ Inlet pressure ≤ 200 bar		

5. 결 론

본 연구에서는 정압베어링에서 입구압력 및 틈새간격 변화에 따른 누설량의 상관관계에 관한 수치해석적 연구를 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 입구압력 및 틈새간격 변화에 따른 포켓압력은 틈새간격(0.01~0.05 mm)이 매우 적고 고점성에 따른 벽면에서 점성영역이 두껍기 때문에 차압이 약 3%로 압력변화가 매우 미미하다.

2) 입구압력에 대한 누설량은 동일한 틈새간격에 대해서 틈새간격의 변화에 따라 약 4.5배에서 6.7배로 변화가 매우 크며, 틈새간격이 커질수록 유량을 결정하는 요소인 단면적이 직경의 제곱에 비례하여 증가하기 때문에 기울기가 커진다.

3) 입구압력, 틈새간격, 누설량 사이에는 선형적인 상관관계가 있음을 확인하였고, 선형보간을 통하여 상관식을 도출하였다.

고점성의 유체는 온도변화에 따른 점도변화가 매우 크기 때문에 향후 연구에서는 본 해석모델에 대하여 온도변화에 대한 포켓압력 및 누설량과의 상관관계에 대한 연구를 진행할 계획이다.