

## 스퀴즈 효과를 고려한 사판식 피스톤 펌프 홀더의 그루브 유무에 따른 부하특성에 대한 연구

# A Study on the Load Characteristics of a Swash Plate Piston Pump Holder (Cradle) with Grooves Considering the Squeeze Effect

주경진<sup>1</sup> · 설상석<sup>1</sup> · 김용길<sup>1</sup> · 김수태<sup>1\*</sup>

Gyeong Jin Ju<sup>1</sup>, Sang Suk Seol<sup>1</sup>, Yong Gil Kim<sup>1</sup> and Soo Tae Kim<sup>1\*</sup>

Received: 12 Dec. 2019, Accepted: 26 Dec. 2019

**Key Words** : Pump(펌프), Holder(홀더), Groove(홈), Load Capacity(부하용량), Squeeze Effect(스퀴즈 효과)

**Abstract:** The load characteristics of a piston pump holder due to the squeeze effect are influenced by the surface shape and gap thickness of the holder (cradle). Therefore, the pressure distribution and the load capacity of the piston pump holder due to the squeeze effect are studied by using the CFD software and the surface shape and gap thickness of the piston pump holder are considered. In order to verify the accuracy of numerical results, the load capacities of a circular plate holder are numerically studied, and the accuracy of numerical results is verified by comparing with the theoretical results. Also, the pressure distribution and load capacity of the rectangular plate holder of a piston pump are obtained by using the CFD software. The results show that the load capacity of the square plate holder with grooves is slightly higher at a low gap thickness, but the effects of the number and arrangement of grooves on the load capacity of the holder are weak. We conclude that the load capacity and the maximum pressure are slightly affected due to the existence of grooves on the holder surface, and the fluid storing effect of the holder surface grooves during the operation is likely to prevent the dry-sticking phenomenon.

### 기호 설명

$\tilde{A}$  : Integration constant

$\tilde{B}$  : Integration constant

$d$  : Inlet diameter, m

$h_o$  : Film thickness, m

$h_{o,1}$  : Initial film thickness, m

$h_{o,2}$  : Final film thickness, m

$p$  : Pressure,  $N/m^2$

$p_m$  : Maximum pressure at  $r = 0$ ,  $N/m^2$

$r$  : Radius, m

$r_b$  : Radius of journal bearing, m

$w$  : Velocity of fluid in  $z$  direction, m/s

$w_z$  : Load capacity,  $N$

$\eta_0$  : Absolute viscosity  $N \cdot s/m^2$

### 1. 서 론

펌프의 경우 각종 댐퍼로 진동을 방지하고, 윤활유에 의한 윤활로 고착 등의 문제를 방지한다.<sup>1)</sup> 하지만 틈새가 매우 좁거나 각종 베어링과 댐퍼가 설치되기 어려운 공간 등에 댐핑 능력을 부여하거나 진동, 소음 등을 제어하기엔 공간적 제약이 큰 경우가 많다. 이를 제어하기 위하여 스퀴즈 효과를 이용할 수 있다.<sup>2)</sup> 현재 스퀴즈 효과를 이용한 부품들은 주로 충격

\* Corresponding author: stkim@changwon.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

Copyright © 2020, 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.

력을 경감시키는데 널리 사용되고 있으며, 회전체의 동적 안정성을 개선하는 효과 역시 있다고 알려져 있다.<sup>3)</sup> 특히 유체 댐퍼의 경우 감쇠특성을 개선하고 안정성을 높이는 작용을 한다.<sup>4)</sup> 1984년 Burrows와 Shinkaya는 간극으로 공급되는 오일의 압력을 조절하여 회전체의 진동모드에 따라 적절한 감쇠 능력을 가지는 SFD(Squeeze Film Damper)를 제시하였으며,<sup>5)</sup> 이를 통해 능동제어형 SFD를 사용하여 회전체를 제어하는 방법이 타 방식에 비해 비교적 저렴하며, 보다 간편하고 신뢰성이 있다는 것을 지적하였다. 또한, 1991년 Mu등은 원추형 베어링 하우징의 위치를 조절함으로써 베어링의 간극과 폭을 조절할 수 있는 능동제어형 SFD의 해석 결과를 이론적으로 제시하였고,<sup>6)</sup> 1993년 Walton II와 Heshmat은 간극 내에 나선형 박판을 설치하여 유막이 여러 층으로 형성된 새로운 형태의 SFD를 제시하기도 하였다.<sup>6)</sup>

그러나 스퀴즈 필름의 특성은 조건의 변화에 따라 지속적으로 변화하므로 이론적으로 예측하기에 어려움이 있다. 특히 스퀴즈 필름의 특성은 평판 홀더(크래들)의 표면형상과 형태, 그리고 틈새 거리에 따라서 크게 달라지고 있다.<sup>7-9)</sup> 따라서 본 연구에서는 표면 형상에 따라 피스톤 펌프 홀더에 작용하는 압력 분포와 부하용량을 CFD 소프트웨어를 이용하여 해석하였으며, 홀더의 형상이 평평한 사각 평판과 그루브를 준 사각 평판의 경우를 비교하여 틈새 변화에 따른 피스톤 펌프 홀더 표면 형상이 부하특성에 미치는 영향을 연구하였다.

## 2. 이론 및 모델링

### 2.1 원형 평판의 이론 및 모델링

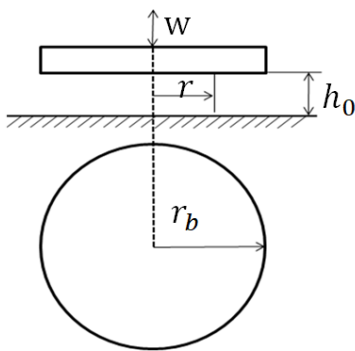


Fig. 1 Circular plate

피스톤 펌프 홀더의 형상은 사판의 설계와 형태에 따라 다양하며 이로 인해 이론 해석이 어려우므로, 수치해석을 수행하기 위하여 먼저 이론해석이 가능한 원형 평판을 모델링하고, 수치 해석 결과와 이론 결과를 비교 검토하여 수치해석 방법의 정확성을 확인하고, 피스톤 펌프 홀더 형상 즉, 사각평판에 대하여 수치해석을 수행하고자 한다.

원형 평판 틈새에 대한 이론 해석을 수행하기 위해 단순한 형태인 일정한 틈새를 가진 원형 평판을 고려하였으며, Fig. 1 에 해석에 사용한 형상을 제시하였다. 유체의 밀도와 점도가 일정하다고 가정하면 스퀴즈 효과에 따른 원형 평판 틈새의 이론 압력분포와 부하용량을 예측할 수 있는 방정식은 식(1)~식(3)과 같이 주어진다.<sup>10)</sup> 틈새 내의 압력분포는 식(2)를 이용하여 구할 수 있으며, 식(3)으로 부하용량을 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r h^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = 12 \eta_0 r \frac{\partial h}{\partial t} = -12 \eta_0 r w$$

$$\frac{d}{dr} \left( r h_0^3 \frac{dp}{dr} \right) = -12 \eta_0 r w \quad (1)$$

$$p = \frac{3 \eta_0 w}{h_0^3} (r_b^2 - r^2), \quad p_m = \frac{3 \eta_0 w r_b^2}{h_0^3} \quad (2)$$

$$w_z = \int_0^{r_b} 2 \pi r p dr = -\frac{3 \pi \eta_0 r_b^4 w}{2 h_0^3}, \quad w = -\frac{dh}{dt}$$

$$w_z = -\frac{3 \pi \eta_0 r_b^4}{2 h_0^3} \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

원형 평판의 틈새에 대한 해석을 위하여 원형 평판이 하강하는 스퀴즈 조건을 경계조건으로 고려하여 이론 해석을 수행하였으며, 틈새는 해석과 시뮬레이션이 가능한 최소 틈새와 틈새 범위를 고려하여  $5 \mu\text{m} \sim 25 \mu\text{m}$  로 정하였다.

그리고, 정상 상태에서 스퀴즈효과를 고려한 수치 해석을 수행하기 위하여 특정 틈새에서 Fig. 2와 같이 평판이 하강하는 스퀴즈 조건을 입구에서 유체가 유입하는 조건으로 대체하고, 출구에서 대기압으로 유출하는 경계조건을 고려하여 수치 해석을 수행하였다.

수치 해석에 사용된 경계조건은 Fig. 2 와 같이 원형 평판 사이의 하강속도를 고려하여 입구에서의 유속을 10m/s, 출구에서는 대기압 조건을 고려하여 Opening으로 설정하였다.

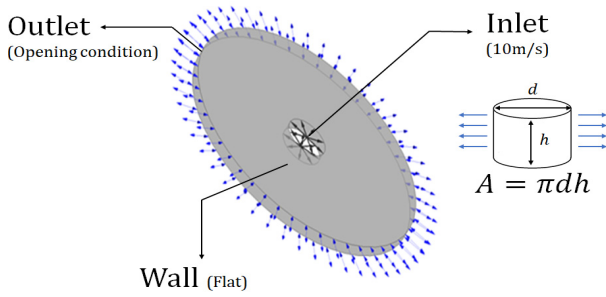


Fig. 2 Boundary conditions of circular plate

### 2.2 사각 평판 홀더의 모델링

피스톤 펌프 홀더는 사판 하부에 장착되어 사판의 진동과 압력에 대해 스퀴즈 효과와 윤활 작용을 이용하여 사판에 작용하는 하중을 유기적으로 받아주는 부품으로, Fig. 3 에 사판식 피스톤 펌프의 사각 홀더 형상과 장착부위를 나타내었다.

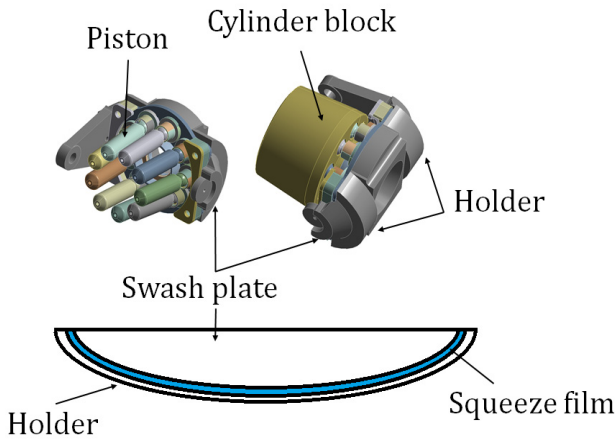


Fig. 3 Piston pump holder (cradle)

사판식 피스톤 펌프 홀더의 그루브 효과를 확인하기 위하여 실제로 사용되는 형상 200mm x 40mm의 사각평판 홀더에 대한 모델링을 수행하였다. 대칭성을 이용하여 Fig. 4 와 같이 홀더의 1/4에 대하여 모델링을 수행하고, 원만한 해석을 위하여 곡률을 가진 평판을 펼쳐진 형태로 두고 해석을 진행하였다. 홀더 표면에 그루브 유무와 그루브 배치 위치에 따른 영향을 알아보기 위해, 홀더의 형상은 Fig. 4에서 보듯이 표면이 평평한 평판, 1~3줄의 그루브를 가지는 평판 및 그루브 배치 위치에 변화를 준 6가지 형상을 모델로 하였다.

사각 평판의 압력분포와 부하용량에 대한 해석을 위해, 틈새가 20μm에서 고착방지를 위한 충분한 부하

용량과 압력을 나타낼 것으로 예상되어, 틈새를 60μm으로 시작하여 10μm씩 줄이면서 최종적으로 20μm의 틈새를 가지도록 모델링하였다. Fig. 5 에 사각 평판 홀더의 수치 해석에 필요한 경계조건을 나타내었다. 경계조건은 평판의 하강속도를 고려하여 입구에서의 유속을 10m/s, 출구 조건은 Opening으로 설정하고 1/4 단면에 대칭조건을 부여하였다.

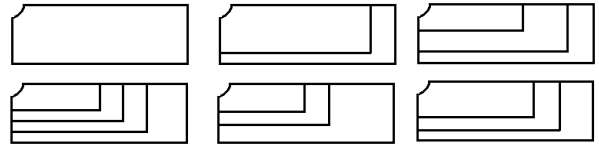


Fig. 4 Rectangular plate models of holder

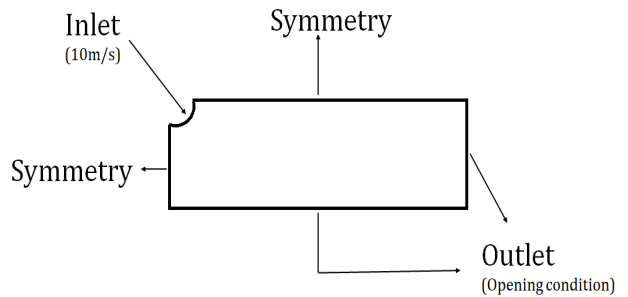


Fig. 5 Boundary conditions of rectangular plate model

## 3. 해석 결과

### 3.1 원형평판 홀더의 이론 및 수치해석 결과

원형 평판이 스퀴즈 효과에 의해 받는 압력분포와 부하용량을 이론적으로 구하고, 수치해석 수행시 스퀴즈 효과를 구현하기 위해 일정한 틈새에서 Fig. 2 와 같이 중심부의 입구 경계면에서 유체가 유입되는 것으로 입구 경계조건을 설정하고, 출구 경계조건은 opening으로 설정하여 ANSYS CFX를 사용하여 해석을 수행하였다. 수치 해석에 사용한 메시는 Hex Dominant 방식을 이용하였으며 노드 25~75만개, 요소 16만~50만개로 잡았다.

원형 평판의 틈새에 따른 부하용량 및 최대압력에 대한 이론 해석 결과와 수치해석 결과를 Fig. 6 과 Fig. 7 에 제시하였다. 원형 평판 모델의 부하용량 및 최대 압력에 대한 이론 해석 결과와 수치 해석 결과가 5~25μm의 틈새 변화에 관계없이 모든 범위에서 1.2% 이내의 오차 범위에서 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 그러므로, 스퀴즈에 의한 유동 해석

에 원형 평판에 적용한 경계 조건과 수치 해석이 유효하다는 것을 확인하였다.

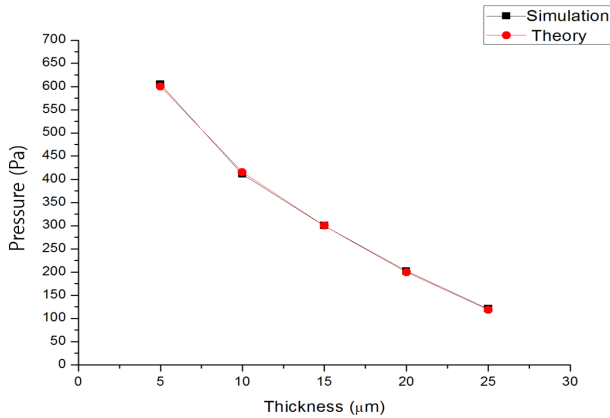


Fig. 6 Maximum pressure comparison between theoretical and numerical results

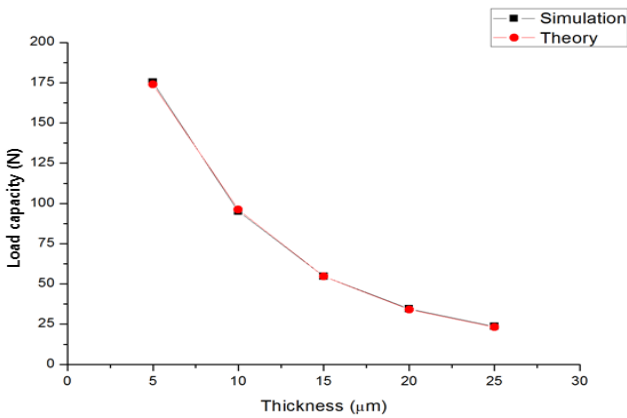


Fig. 7 Load capacity comparison between theoretical and numerical results

### 3.2 사각평판의 해석 결과

스퀴즈에 의한 유동 해석시 원형 평판에 적용한 경계 조건과 수치 해석의 정확성을 확인하고, 원형 평판 해석 방법을 사판식 피스톤 펌프 홀더(사각 평판)에 적용하고, Fig. 5 에 제시된 경계조건을 사용하여 수치 해석을 수행하였다.

특새 20μm인 경우에 피스톤 펌프 홀더 표면 형상에 따른 압력분포를 Fig. 8 ~ 13 에 제시하였다. Fig. 8 은 평평한 평판, Fig. 9 는 1개의 그루브를 가진 모델, Fig. 10 은 2개의 그루브를 가진 모델, Fig. 11 은 3개의 그루브를 가진 모델, Fig. 12 는 2개의 그루브가 중심부에 가깝게 위치하고 있는 모델, Fig. 13는 2개의 그루브가 중심부에서 멀리 위치하고 있는 모델이다.

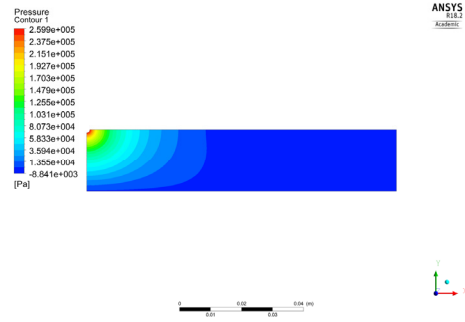


Fig. 8 Pressure distribution (flat, 20μm)

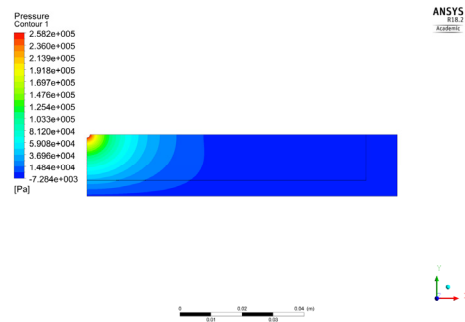


Fig. 9 Pressure distribution (1-grooved, 20μm)

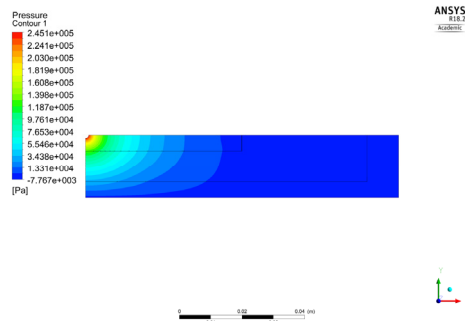


Fig. 10 Pressure distribution (2-grooved, 20μm)

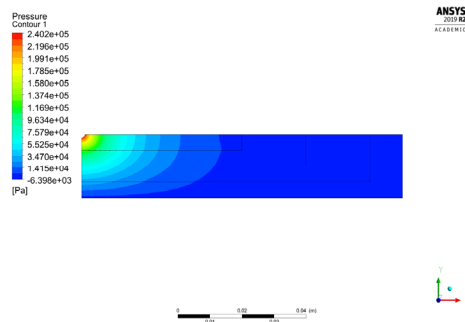


Fig. 11 Pressure distribution (3-grooved, 20μm)

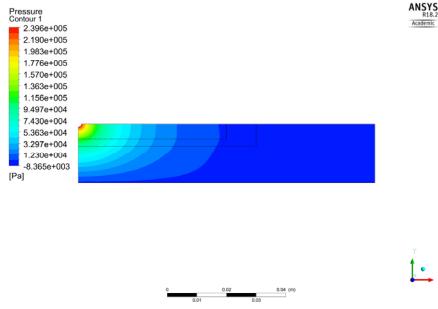


Fig. 12 Pressure distribution (2-grooved inner, 20µm)

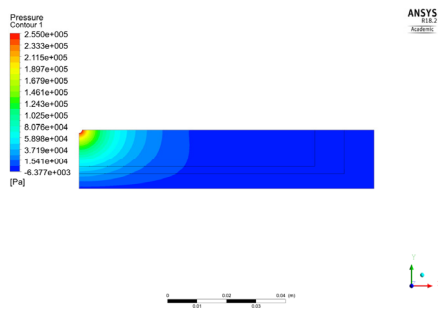


Fig. 13 Pressure distribution (2-grooved outer, 20µm)

그루브의 위치와 숫자에 따라 각 사각평판 홀더의 압력분포가 약간씩 변화하는 것을 확인할 수 있으며, 최대 압력은 입구에서 나타나고 있다.

틈새가 20µm이 경우에 사각평판 홀더의 최대압력은 그루브가 없는 평평한 형상에서 259.9 kPa로 나타나고, Fig. 9~11에서 보듯이 그루브가 1개인 경우 258.2 kPa, 그루브가 2개인 경우 245.1 kPa, 그루브가 3개인 경우 240.2kPa 로 그루브 수가 증가할수록 낮게 나타나고 있다. 사각평판 홀더는 그루브가 없는 경우가 최대압력이 가장 크게 나타나고 있다. 그루브 배치에 따른 최대 압력은 Fig. 12~13에서와 같이 2개의 그루브가 중심에서 멀리 위치한 것이 최대 압력이 크게 나타나고 있다.

틈새에 따른 최대 압력은 20µm에서 259.9kPa, 30µm에서 97.3kPa, 40µm에서 48.6kPa, 50µm에서 28.1kPa, 60µm에서 17.7kPa로 나타나고 있다. 틈새 30µm 이상에서는 홀더 표면 형상의 차이에 따른 최대 압력이 거의 비슷하게 나타나나, 틈새 30µm 이하에서는 최대 압력에서 약간의 차이를 보이고 있다. 그루브가 없는 평평한 경우에 최대압력이 크게 나타나고 그루브 수가 증가할수록 최대압력이 낮게 나타나고 있으나, 그루브 수가 증가할수록 압력이 낮아지지만 상대적 고압영역이 넓어져 전체적인 부하용량

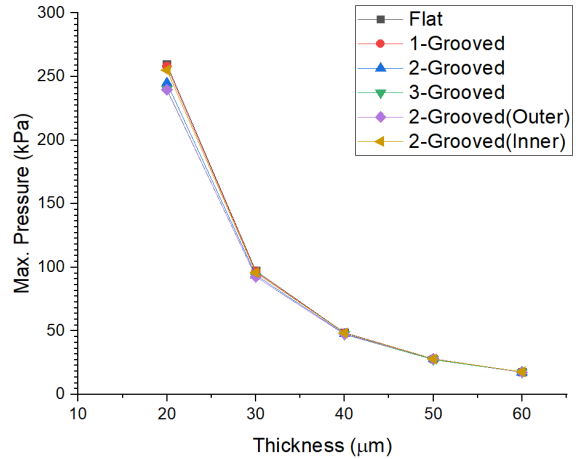


Fig. 14 Maximum pressure according to film thickness of rectangular plate

에는 큰 차이가 없는 것으로 나타나고 있다.

틈새에 따른 최대 압력의 결과를 Fig. 14 에 제시하였다.

사각 평판의 부하용량에 대한 수치 해석 결과를 Fig. 15 및 Table 1 에 제시하였다. 부하용량의 경우 틈새가 작을수록 부하용량이 증가하며, 틈새 30µm 이하에서 크게 증가함을 알 수 있다. 틈새 20µm 에서 부하용량이 홀더 표면 형상에 따라 약 2.5% 정도의 차이를 보이나, 전반적으로 그루브의 존재 여부에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타나고 있다.

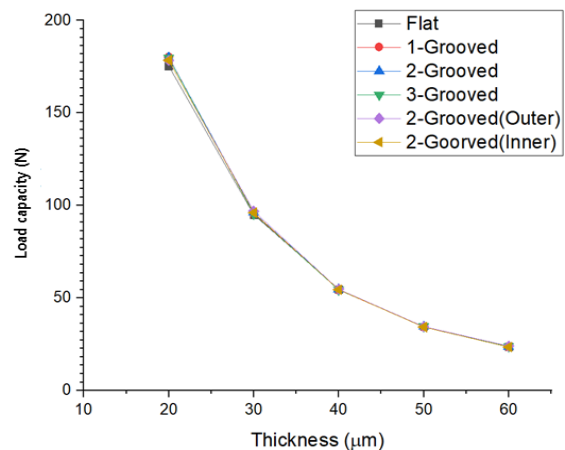


Fig. 15 Load capacity according to film thickness of rectangular plate

틈새에 따른 부하용량은 20µm에서 180.2 N, 30µm에서 95.7N, 40µm에서 54.7N, 50µm에서 34.6N, 60µm에서 24N으로 나타나며, 틈새가 감소할수록 부하용량이 크게 증가하고 있다.

Table 1 Load capacity(N) in rectangular plate

Gap Type	20 $\mu$ m	30 $\mu$ m	40 $\mu$ m	50 $\mu$ m	60 $\mu$ m
Flat	175.4	95.0	54.7	34.5	23.6
1-Grooved	180.2	95.7	54.4	34.4	23.6
2-Grooved	180	96.2	54.7	34.6	23.8
3-Grooved	179.8	95.4	54.4	34.6	23.8
2-Grooved (Outer)	178.3	97.0	54.7	34.6	24.0
2-Grooved (Inner)	178.5	96.1	54.5	34.3	23.5

Table 1에서 평판과 그루브가 존재하는 경우에 40 $\mu$ m 이상에서 부하용량 차이가 거의 나타나지 않고, 틈새가 작을수록 그루브로 인한 부하용량 증가가 미세하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 피스톤 펌프 홀더에 대한 압력분포와 부하용량을 해석하였다. 해석 결과, 홀더 평판의 최대 압력은 그루브가 없는 평평한 모델이 가장 높게 나타나지만 그루브 수가 증가할수록 압력을 완화시키는 역할을 하여 전체적인 평균압력에는 큰 차이가 없는 것으로 나타나고 있다. 부하용량의 경우 평판에 그루브로 인한 부하용량의 변화는 미미하게 나타나고 있다. 즉, 그루브가 부하용량에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타나고, 틈새에 따른 부하용량은 틈새가 작아짐에 따라 부하용량이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있고 이 결과는 최대 압력의 결과에서도 확인할 수 있다.

또한, 그루브에는 유체를 저장하는 효과가 있으므로 저장된 유체는 작동중 윤활작용을 돕고 작동유체의 건조로 인한 부품 고착을 예방할 것으로 예상되므로 평평한 경우보다 그루브를 가지는 모델이 부품 고착 방지와 윤활에 더 유리할 것으로 예상된다.

#### 후 기

“2019~2020년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 결과임”

#### References

- 1) Y. C. Rhim, “An Analysis of Dynamic Characteristics of Squeeze Film Bearing using Pulsating Flow”, Research Report, KOSEF 951-1005-026-1, 1996.
- 2) Y. K. Ahn et al., “Performance of Squeeze Film Damper Using Magneto-Rheological Fluid”, Proceedings of the KSNVE 2002 Annual Spring Conference, pp.67-70, 2002.
- 3) E. J. Gunter, L. E. Barrett and P. E. Allaire, “Design of Nonlinear Squeeze-Film Dampers for Aircraft Engines”, Journal of Lubrication Technology, Vol.99, No.1, pp.57-64, 1977.
- 4) S.-C. Yoon and S. Kang, “Dynamic Oil Film Force Response of a Squeeze Film Damper”, Proceedings of the KSME 1991 Spring/Autumn Conference, pp.668-671, 1991.
- 5) C. R. Burrows, M. N. Sahinkaya and O. S. Turkyay, “An Adaptive Squeeze-Film Bearing”, ASME Journal of Tribology, Vol.106, No.1, pp.145-151, 1984.
- 6) C. Mu, J. Darling and C. R. Burrows, “An Appraisal of a Proposed Active Squeeze Film Damper”, Journal of Tribology, Vol.113, No.4 pp.750-754, 1991.
- 7) S. Dousti, A. Gerami and M. Dousti, “A Numerical CFD Analysis on Supply Groove Effects in High Pressure, Open End Squeeze Film Dampers”, International Journal of Engineering Innovation & Research, Vol.5, No.1, pp.80-89, 2016.
- 8) L. S. Andrés, “Squeeze Film Dampers: Operation, Models and Technical Issues”, Modern Lubrication Theory, Note 13, Texas A&M University, TX, 2010.
- 9) M. F. Pantano, L. Pagnotta and S. Nigro. “A numerical study of squeeze-film damping in MEMS-based structures including rarefaction effects”, Frattura ed Integrità Strutturale, Vol.23, pp. 103-113, 2013.
- 10) B. J. Hamrock., Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw-Hill Education, New York, pp.284-290, 1994.