

물 정수압 저널 베어링의 이론적 해석

박성환 · 박상신*[†]

동우화인캡
*영남대학교 기계공학부

Theoretical Analysis of Water Hydrostatic Journal Bearings

Seong-Hwan Park and Sang-Shin Park*[†]

Dongwoo Fine-Chem

**Dept. of Mechanical Engineering, Yeungnam University*

(Received January 19, 2011; Revised February 26, 2011; Accepted February 27, 2011)

Abstract – In this study, the nondimensional load capacity of water hydrodynamic journal bearings is calculated. A generalized coordinate formulation is applied to handle the complexity of bearing geometry. A window-based analysis program is developed to analysis the cylindrical hydrostatic bearings. Load capacities are calculated according to some design parameters such as clearance, diameter of orifice, size of recesses and temperature. The results are presented and discussed.

Keywords – a generalized coordinate(일반좌표계), cylindrical journal bearing(원통형 저널 베어링), load carrying capacity(하중 지지용량), orifice(오리피스)

1. 서 론

정수압 베어링은 외부에서 유체를 베어링 내에 공급시켜 상, 하 공급되는 유체의 압력차이로 축을 지지하는 베어링으로 접촉면들이 정지시에도 일정한 간극을 유지한다. 정수압 베어링은 동압 저널 베어링에 비하여 높은 강성, 하중 지지 용량, 저마찰, 높은 댐핑 특성을 가지고 있다. 이러한 이유로 정수압 베어링은 공작기계, 압연기, 베어링 시험기 등 정밀 산업 기계에 사용 되고 있다.

정수압 베어링의 특성에 영향을 미치는 요인으로는 베어링의 형상, 베어링 틈새, 외부에서 공급되는 압력, 유효유점의 점도, 온도, 리스트릭터(Orifice, Capillary 등)와 Recess의 위치, 크기 등이 있다. 이러한 요인들은 서로가 독립적으로 작용하기 보다는 상호 적으로 작용한다고 볼 수 있기 때문에 인자들의 상관관계를 좀 더

면밀히 알 수 있다면 정수압 베어링의 성능을 향상 시키는데 큰 도움이 된다.

정수압 베어링은 형상에 따라 원통형, 원추형, 구면형으로 구분되지만 본 연구에서는 원통형 베어링을 해석했고, 유체 공급방식은 Orifice를 사용하였고, 베어링의 틈새와 Orifice size, Recess의 크기, 온도 등에 따른 하중지지용량을 실험하였다.

유체의 흐름에 대한 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식으로부터 비압축성 Reynolds 방정식을 유도하여 일반좌표계로 변환 시킨 뒤 사용하였고, 베어링의 성능을 향상시킬 수 있는 프로그램을 개발해서, 베어링 틈새와 Orifice, 온도간의 상관관계를 찾아 베어링의 지지 용량의 최적화된 상태를 구하기 위해 Visual Studio에서 MFC를 이용한 프로그램을 개발, 이용하여 실험하였다.

2. 일반좌표계의 레이놀즈 방정식

Fig. 1은 직각좌표계를 (s,q) 좌표계로 나타낸 그림으

[†]주저자 · 책임저자 : pss@ynu.ac.kr

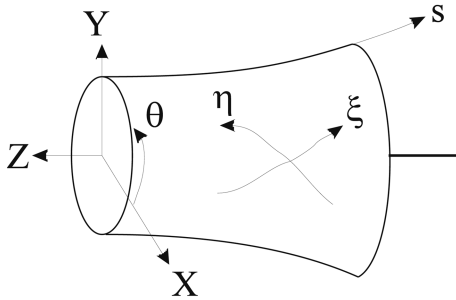


Fig. 1. Generalized coordinates.

로 베어링 임의의 형상을 고려하여 임의의 좌표계 (ξ, η)를 설정한다. 유체의 흐름에 관련된 Navier-Stokes와 연속방정식을 이용해 Reynolds방정식을 유도하고 (s, θ) 좌표계로 변환한 다음 η, ξ 방향으로 질량유량을 구한 일련의 과정은 Ref. [1]을 바탕으로 하여 유도하였으며 질량유량에 관한 공식은 다음과 같다.

$$Q^\xi = \int_{\eta_1}^{\eta_2} \sqrt{\alpha} q_n^\xi d\eta = \int_{\eta_1}^{\eta_2} \rho(-Ap_\xi + Bp_\eta + D) d\eta$$

$$Q^\eta = \int_{\xi_1}^{\xi_2} \sqrt{\gamma} q_n^\eta d\xi = \int_{\xi_1}^{\xi_2} \rho(Bp_\xi - Cp_\eta + E) d\xi$$

여기서 계수는 다음과 같다.

q_n^ξ 는 단위길이당 n^ξ 방향의 질량유량
 q_n^η 는 단위길이당 n^η 방향의 질량유량

$$\alpha = s_\eta^2 + (r\theta_\eta)^2, \beta = s_\eta s_\xi + (r\theta_\xi)(r\theta_\eta)$$

$$\gamma = s_\xi^2 + (r\theta_\xi)^2, J = s_\xi(r\theta_\eta) - s_\eta(r\theta_\xi)$$

$$A = (h^3/12\mu)(\alpha/J), B = (h^3/12\mu)(\beta/J)$$

$$C = (h^3/12\mu)(\gamma/J), D = -hs_\eta r\omega$$

$$E = hs_\xi r\omega, \omega = (\omega_1 + \omega_2)/2 - \omega_p$$

질량유량 식으로부터 이산화된 방정식을 구하기 위해 Fig. 2에서 절점영역을 사용한다. Fig. 2에서 첨자는 ξ 방향의 절점번호, j 는 η 방향의 절점번호를 나타낸다.

비압축성 유체의 유동에 대해서 $\rho = \text{const}$ 라는 가정을 하고, 절점 셀은 한 절점에서 주변의 절점으로 둘러 쌓인 영역으로 정의한다. 각각의 절점에서의 s, θ, R 의 값의 주어져 있으며, h 와 $\delta h/\delta t$ 와 가 절점 셀의 중앙 부위에서 정해져 있고, 압력 p 는 절점에서의 압력으로 정의한다. 절점 셀이 작다고 가정하면 주변절점과의 압력 변화를 선형압력분포라 가정하면 Fig. 2에서 4개의 영역(I,II,III,IV)에 대해서 선형압력 분포를 얻을 수 있다.

A, B, C, D, E는 절점셀의 중심선에 $\xi = i-1/2, \eta =$

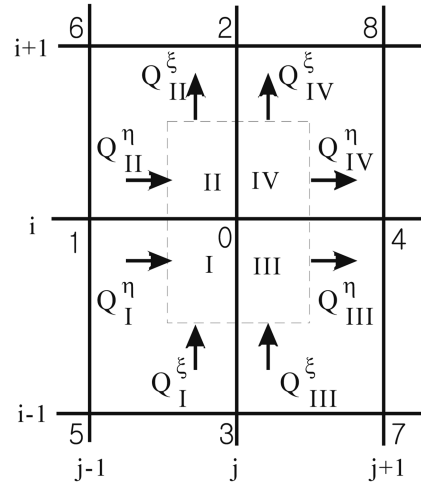
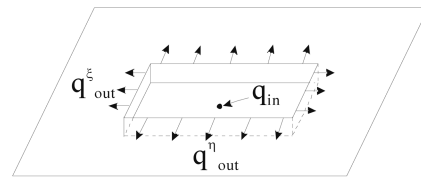
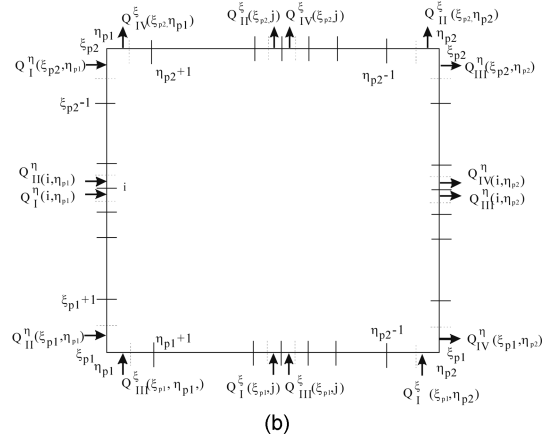


Fig. 2. Inflow and outflow of DF region.



(a)



(b)

Fig. 3. Inflow and outflow around pocket boundary region.

$j-1/2$ 에서의 값으로 대표하고 격자간 영역 내에서 일정하다고 근사화하는 계단함수형의 가정을 사용하면 각 영역에서의 Q^η, Q^ξ 를 구할 수 있다

계단함수형으로부터 구한 각 영역에서의 질량유량 Q^h, Q^v 와 흡수되는 유량을 연속 방정식에 대입하면 다음과 같은 대수방정식을 구할 수 있다.

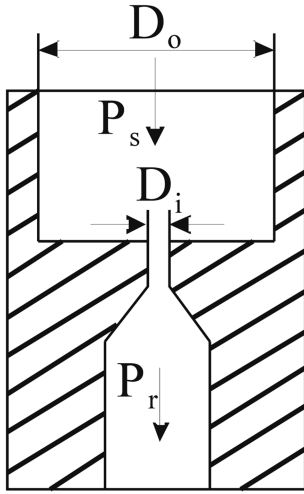


Fig. 4. Configuration of orifice.

$$a_7 p_{o_{i,j+1}} + a_4 p_{o_{j+1}} + a_8 p_{o_{i+1,j+1}} + a_1 p_{o_{i,j}} + a_0 p_{o_{i,j}} + a_2 p_{o_{i+1,j}} + a_3 p_{o_{i,j+1}} + a_5 p_{o_{i,j}} + a_6 p_{o_{i+1,j-1}} = a_9$$

여기서 계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_0 &= -3(A_I + A_{II} + A_{III} + A_{IV} + C_I + C_{II} + C_{III} + C_{IV}) \\ &\quad + 4(B_I - B_{II} - B_{III} - B_{IV}) \\ a_1 &= -3(A_I + A_{III}) - C_I - C_{III}, a_2 = -3(A_{II} + A_{IV}) - C_{II} - C_{IV} \\ a_3 &= -A_I - A_{II} + 3(C_I - C_{II}), a_4 = -A_{III} - A_{IV} + 3(C_{III} + C_{IV}) \\ a_5 &= A_I + C_I - 4B_I, a_6 = A_{II} + C_{II} + 4B_{II}, a_7 = A_{III} + C_{III} + 4B_{III} \\ a_8 &= A_{IV} + C_{IV} - 4B_{IV} \\ a_9 &= 8Q_{i,j}^V - 4(D_I - D_{II} + D_{III} - D_{IV} + E_I + E_{II} - E_{III} - E_{IV}) \end{aligned}$$

Fig. 3에서는 Pocket의 경계면에서의 유출유량을 나타낸다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{out} &= - \sum_{j=\eta_{p1}}^{\eta_{p2}-1} Q_{III}^{\xi}(\xi_{p1}, j) - \sum_{j=\eta_{p1}+1}^{\eta_{p2}} Q_i^{\xi}(\xi_{p1}, j) \\ &\quad + \sum_{j=\eta_{p1}}^{\eta_{p2}-1} Q_{IV}^{\xi}(\xi_{p2}, j) + \sum_{j=\eta_{p1}+1}^{\eta_{p2}} Q_i^{\xi}(\xi_{p2}, j) \\ &\quad - \sum_{i=\xi_{p1}}^{\xi_{p2}-1} Q_{II}^{\eta}(i, \eta_{p1}) - \sum_{i=\xi_{p1}+1}^{\xi_{p2}} Q_i^{\eta}(i, \eta_{p1}) \\ &\quad + \sum_{i=\xi_{p1}}^{\xi_{p2}-1} Q_{II}^{\eta}(i, \eta_{p2}) + \sum_{i=\xi_{p1}+1}^{\xi_{p2}} Q_{III}^{\eta}(i, \eta_{p1}) \end{aligned}$$

오리피스에서 공급되는 유량이 Recess 에서 나가는 유량과 같다고 가정하면, 공급압력이 P_s이고, 포켓압력이 P_r 일 때, 오리피스를 통해서 포켓에 공급되는 유량은 다음과 같이 정의 된다.

$$Q_{in} = K_B \sqrt{P_s - P_r}$$

여기서 A_i는 오리피스의 급유구의 단면적, A_o는 오리피스에서 급유구로 축소되는 부분의 단면적으로 오리피스의 유량계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_B &= \left(\sqrt{\frac{\rho}{2}} \right) \left[\frac{1}{\alpha A_i} - \frac{1}{A_o} \right] \sqrt{P_s - P_r} \\ \alpha &= 0.63 + 0.37 \left(\frac{A_i}{A_o} \right)^6 \end{aligned}$$

펌프에서 공급된 유체가 오리피스로 공급되는 유량을 Q_{in}, Pocket boundary에서 유출되는 유량이 Q_{out} 이라면 공급되는 유량과 유출되는 유량이 같고 다차원 뉴턴 랩슨법을 이용하여 각 포켓에서의 공급되는 유체와 유출되는 유체의 차이를 0이라 두어 베어링 표면의 압력 분포를 구하며 방식은 Ref 1.를 참조하였다.

베어링 내부의 압력 분포를 구하기 위한 경계조건은 다음과 같다.

베어링 양단에서의 대기압 조건

$$P(\theta, Z = \pm \frac{B}{2R}) = 1$$

베어링 원중방향에서의 연속 조건

$$P(\theta, Z) = P(\theta + 2\pi, Z)$$

베어링 중양에서의 축방향 대칭 조건

$$p(\theta, Z) = P(\theta, -Z)$$

베어링 내부의 압력분포의 경계조건을 이용하여 식 (3), (4)을 바탕으로 프로그램을 작성하여 압력분포를 계산하고, 그 압력분포를 베어링 표면에 따라 적분하여 베어링의 하중지지용량을 구할 수 있는데 자세한 과정은 Ref. 1에 수록되어 있다.

3. 해석 결과

본 연구에서는 일반좌표계로 변환하여 질점을 만들었기 때문에 베어링 형상을 원통형뿐만 아니라 원추형, 구면형까지 하중지지용량을 구할 수 있지만 본 해석에서는 원통형 베어링에 관해서 해석을 실행하였다.

해석 프로그램은 Visual Studio 2008을 이용하여 MFC로 만들어 프로그램 사용자가 베어링 직경, 폭, Orifice 직경, 편심률, 자세각 등을 입력하면 프로그램이

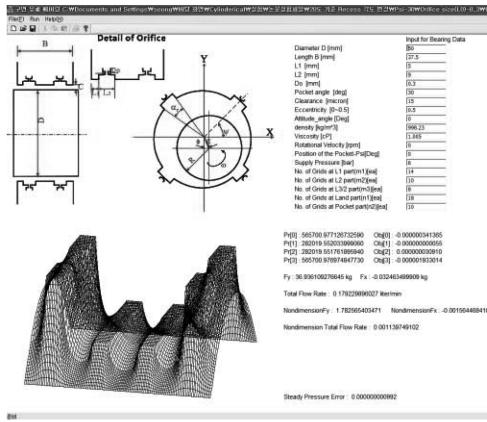


Fig. 5. Output screen of cylindrical bearing.

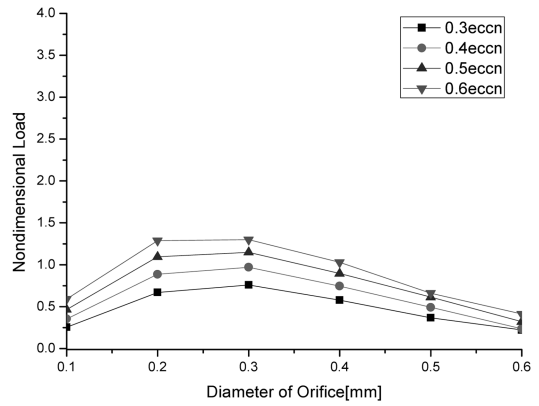
Table 1. Specification of bearing

Diameter	50 mm
Length	35 mm
Clearance	15~30 μm
Pocket Angle	30~60 deg
Eccentricity	0~0.6
Supply Pressure	4~8 bar

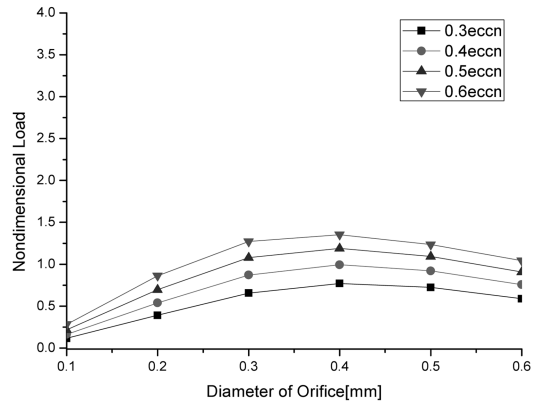
실행되어 베어링 내의 압력분포를 나타내며 x, y방향으로 하중과 충유량을 나타내도록 했으며, 무차원으로도 나타내게 하였다. 그에 대한 예를 Fig. 5에 나타내었다.

본 연구에서 해석 대상으로 삼은 원통형 베어링의 사양과 베어링의 형상에 대한 자료를 Table. 1에 나타내었다.

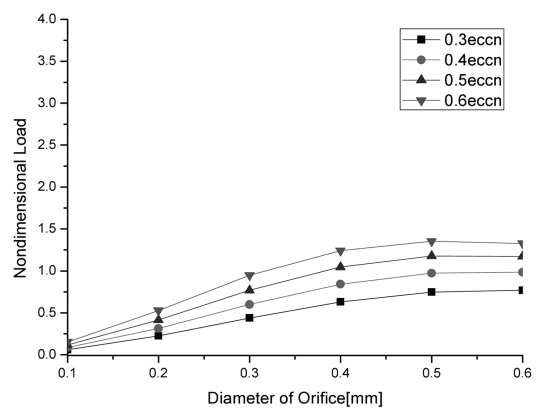
Fig. 6과 Fig. 7은 물 온도는 20도를 기준으로 점도를 계산하여서 입력하고, 편심률을 0.3~0.6, 공급압력을 4 bar, 6 bar로 하여서 축과 베어링의 Clearance를



Clearance 15 μm of between shaft and bearing (a)

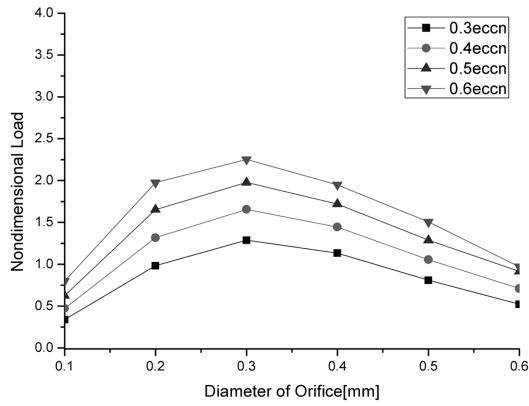


Clearance 20 μm of between shaft and bearing (b)

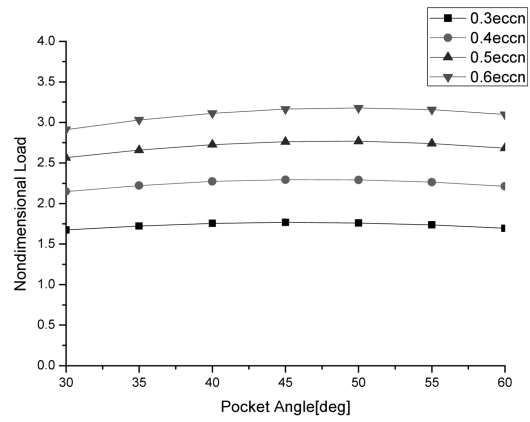


Clearance 25 μm of between shaft and bearing (c)

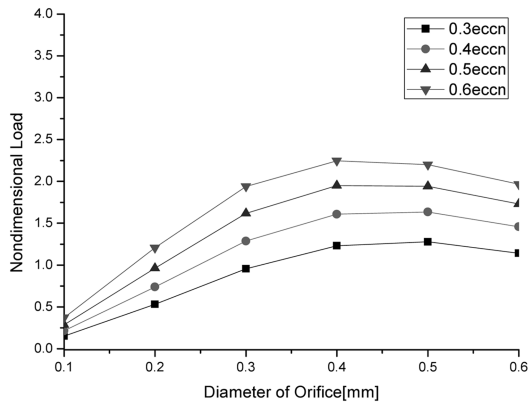
Fig. 6. Nondimensional load with diameter of orifice in supply pressure 4 bar.



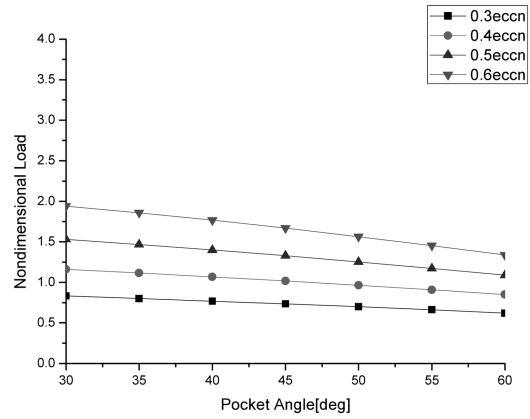
Clearance 15µm of between shaft and bearing
(a)



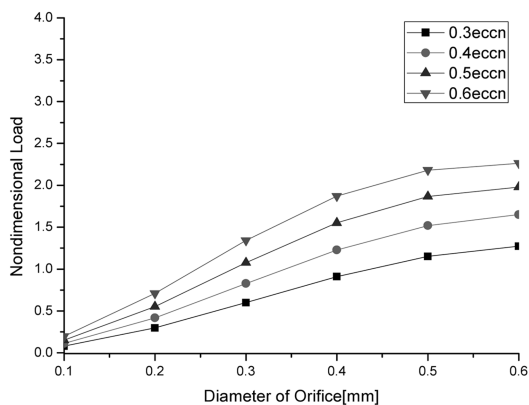
(a) Clearance 15µm of between shaft and bearing



Clearance 20µm of between shaft and bearing
(b)



(b) Clearance 25µm of between shaft and bearing



Clearance 25µm of between shaft and bearing
(c)

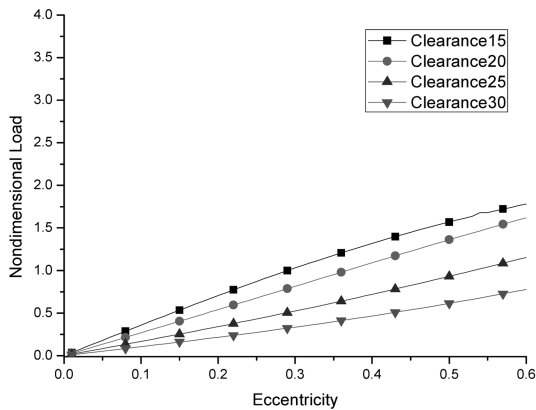
Fig. 7. Nondimensional load with diameter of orifice in supply pressure 6 bar.

Fig. 8. Nondimensional load with pocket angle in supply pressure 8 bar.

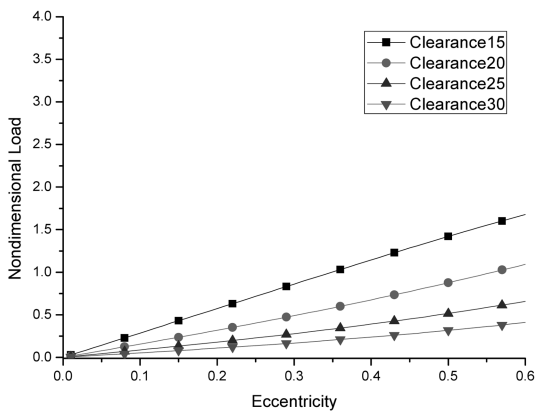
15~25 µm 까지 5 µm씩 변경하여서 무차원 하중을 구한 데이터이다.

Fig. 6 (a)에서 물 온도 20도, 공급압력이 4 bar일 경우 Clearance 15 µm일 때 오리피스 0.2 mm부근에서 가장 무차원 하중이 크게 나타나지만 (b), (c)에서는 Clearance를 크게 하면 할수록 오리피스의 직경도 변하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7 과 비교해서 보면 공급압력이 커질수록 같은 용량의 베어링에서 무차원 하중이 달라지는 것을 알 수 있지만 Clearance가 25 µm 이상이 되면 오리피스직경에 대한 무차원하중이 선형적으로 가는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 물 온도 20도, 공급압력 8 bar에서 원 중심에서 Pocket의 Recess까지 각을 변경해 갔을 경우 해석한 데이터이다. Clearance가 15 µm에서는 50도 부



(a) Water Temperature in 20 degree



(b) Water Temperature in 60 degree

Fig. 9. Nondimensional load with eccentricity in supply pressure 5 bar.

근에서 가장 큰 무차원 하중이 나타나지만 그 이외의 Clearance에서는 Pocket의 각도가 가장 작은 부분에서 큰 무차원 하중이 나타나는 것을 볼 수가 있다. Clearance와 베어링의 Recess간에 무차원 하중에는 최적화 된 베어링 형상이 있다는 것을 알 수가 있다.

Fig. 9 (a) 물 온도 20도, (b) 물 온도 60도, 공급 압력 5bar에서 편심률에 관한 무차원 하중이다. 그림에서 보듯이 Clearance를 때 가장 큰 무차원하중이 나오지만 Clearance와 유체의 온도에 적합한 관계를 찾는 것이 가장 중요한 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 레이놀즈 방정식을 일반좌표계에 적

용시켜 원통형 베어링의 하중지지용량을 구해내서 무차원으로 변환시켜 프로그램에 나타나도록 하였다. 원통형 베어링에서 베어링의 형상에는 Clearance, 공급압력, 유체온도, 편심률, Recess의 크기가 베어링의 하중지지용량에 큰 역할을 하는 것을 알수있으며 이를 바탕으로 성능이 더 높은 베어링을 만들 수 있을 것이다.

기호설명

- B bearing width
- C bearing clearance
- D_0 pocket supply width
- D_i orifice supply width
- J Jacobian for the transformation of coordinates
- p pressure
- p_0 steady state film pressure
- p_s supply pressure
- p_i pocket pressure
- Q flow rate through the control line
- R bearing radial
- s meridian coordinate
- ξ, η generalized coordinate on the bearing surface
- ρ density of the lubricating fluid
- ω angular velocity of the shaft
- θ circumferential coordinate

참고문헌

1. 박상신, “조정밀 공작기계용 공기베어링의 해석 및 진동 특성 측정에 관한 연구,” 서울대학교 박사학위 논문, 1995.8.
2. 안문호, “정수압 제어널 베어링의 동특성 향상에 관한 연구,” 서울대학교 석사학위 논문, 1997.2
3. 박상신, 김영진, 유송민, “일반좌표계 변환을 이용한 해링본 그루브 베어링의 해석,” *한국윤활학회*, 제 16권, 제6호, pp. 432-439, 2000.
4. 이기영, “자기보상형 리스트릭터를 이용한 연삭기 주축용 정수압 베어링의 고강성화에 관한 연구,” 서울대학교 박사학위 논문, 1998.3.
5. W.B. Rowe, “Hydrostatic and Hybrid Bearing Design”, Butterworths, 1983.
6. Hamrock “Fundamentals of Fluid Film Lubrication”, Mc Graw-Hill, 1994.