

유체의 관성력과 스월의 영향을 고려한 난류 하이브리드 베어링의 해석

이용복 · 김창호 · 최동훈*

한국과학기술연구원 기전연구부
*한양대학교 기계설계학과

An Analysis for Turbulent Hybrid Bearings with Fluid Inertia and Swirl Injection Effects

Yong-Bok Lee, Chang-Ho Kim and Dong-Hoon Choi*

*Devision of Mechanical & Control System, KIST
Devision of Mechanical Design and Production Engineering, Hanyang University

Abstract—An analysis for turbulent hybrid bearings with fluid inertia and swirl injection effect was derived for studying static characteristics of swirl-controlled hybrid journal. The swirl-controlled hybrid journal bearing is considered to have more freedom in stability control in high speed rotating machinery. Current analysis is compared with experimental results with 3-recess hydrostatic journal bearing. The analysis revealed that the fluid momentum exchange at orifice discharge could produce pressure rise inside the recess region which can control the shear flow induced by journal rotation. The analysis also shows that the swirl-controlled hybrid journal bearing has a capability of controlling load carrying capacity and stability by manipulating supply pressure and injection angle.

Key words—Tubulent Flow Coefficients, Finite Difference Method, Ram Pressure Effect, Inertia Effect, Swirl-Controlled Hybrid Journal Bearing.

1. 서 론

베어링이나 시일 내의 유체는 축이 회전함에 따라 유체와 고체 사이의 상호 작용이 원인이 되어 진동이 발생하는데 축이 한계속도(threshold speed)에 도달하면 유체의 휘돌림(whirling)의 증가로 로터는 자신이 진동(self-acting vibration)하여 시스템 전체에 진동을 야기시킨다. 이러한 불안정성(instability)에 대한 해결 방안 중 Tondl [1]은 가스 베어링으로 지지 되는 로터 회전 방향에 반대 방향으로 가스를 주입 시키면 이러한 불안정성을 유발하는 요소를 줄 일수 있음을 처음으로 제안하였다. 결국 이는 축의 회전에 따른 유동의 회전 속도를 감소시키는 방안인데 문헌적으로는 Muszynska [2]-[3] 등이 공기 베어링의 휘돌림의 제어

에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고 San Andres [4]-[5] 등은 고속 베어링의 동 특성을 해석하기 위하여 Constantinescu 와 Galetuse [6]가 제안한 2차원 압력구배 식과 Hirs의 bulk flow model [7]에 따른 난류 전단계수(turbulent shear parameter) 등을 적용하여 연구하였으며 또한 Nelson[8]이 제안한 국소 마찰 계수 등을 하이브리드 저널 베어링 해석에 적용하였다. 이러한 유체 기계 내의 유동제어에 따른 일련의 실험적 연구로는 Kim과 Lee [9]-[11] 등이 시일과 베어링에 대하여 유동의 형태에 따른 정적 및 동적을 연구하였는데 특히 틈새 내의 유동의 특성을 효율적 제어할 수 있도록 유로를 새로히 고안하였다. 일반적으로 지금까지의 이 분야의 연구는 유동의 방향 및 크기의 제어를 통한 실험적 연구가 주로 행하여 졌는데 이는 실제

유동장의 형태가 난류 영역의 3차원 유동임을 감안할 때 해석의 어려움을 가졌다.

따라서 본 논문은 경사각을 지니고 입사하는 하이브리드 베어링의 포켓내 유동 형태를 표현하기 위하여 단순화한 모델을 정립하고, 축의 고속 회전에 의한 동압 효과로 발생하는 램 효과(ram pressure effect) 및 관성 효과를 고려한 해석을 수행 하였다. 아울러 입사각 및 입사 압력의 세기에 따른 모멘트 변화가 내부 압력구배에 미치는 영향을 고찰하고 또한 이것이 베어링의 정적 하중 지지 특성에 미치는 영향도 연구하여 스웰 제어를 통한 베어링의 정적 및 동적 특성 향상 방안에 대한 기본 자료로 활용하고자 하였다.

2. 난류의 영향 및 유체의 관성 효과를 고려한 하이브리드 베어링의 이론적 연구

2-1. 하이브리드 베어링의 모델링

하이브리드 저널 베어링의 개략도는 Fig. 1과 같다. 고정된 하우징 내부에서 축은 편심 거리 e 를 유지하며 회전하고 이 때 윤활에 의하여 회전 시 압력이 발생되어 하중을 지지하게 되며 이러한 정적 평형점은 자세각(attitude angle)를 갖게 된다. 특히 저 점도의 고속 하이브리드 저널 베어링은 난류 영역의 해석이 필요하며 이는 식 (1)에 나타낸 것과 같이 수정된 레이놀즈 방정식을 적용하기도 한다. 일반적으로 베어링 유막에서의 유체의 관성 효과의 고려는 유체의 유동 속도, 점도 그리고 베어링 유동면의 형상 및 거칠기 등이 중요한 변수로 좌우된다. 그러므로 특히 스텝형상의 포켓을 갖는 베어링의 경우 베어링의 랜드부위에서의 관성력은 베어링 모서리(선단)에서의 유동 속도 구배에 의한 관성 효과에 비하면 그 효과가 매우 작아 보통은 무시한다[6].

수정된 레이놀즈식은 식(1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{h^3}{\mu} G_x \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{h^3}{\mu} G_z \frac{\partial P}{\partial Z} \right) = \frac{U}{2} \frac{\partial h}{\partial X} + \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 G_x, G_z 는 각각 원주 방향과 축방향의 난류 계수(turbulent flow coefficients)로 국소(local) 레이놀즈수와 압력구배의 함수로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$G_x = G_z = \frac{1}{12} : \text{층류}$$

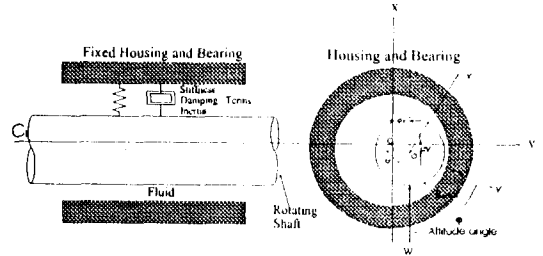


Fig. 1. Geometry of hybrid journal bearing.

Couette flow :

$$G_x = 12 + 0.0136R_c^{0.9} : \text{난류}$$

$$G_z = 12 + 0.0043R_c^{0.96}, 10^3 < R_c < 3 \times 10^4 : \text{난류} \quad (2)$$

Poiseuille flow :

$$G = G_x = G_z = 6.8R_p^{0.681}, 10^3 < R_p < 10^5$$

여기서 R_c 는 회전에 기인한 레이놀즈수이며, R_p 는 압력 구배에 따른 유체의 평균 속도에 의한 레이놀즈수이다.

2-2. 하이브리드 베어링 포켓 부위에서의 유동해석

Fig. 2는 고속 하이브리드 베어링의 포켓 부위에서의 압력 분포를 가정한 개략도로 축의 고속회전에 기인한 동압 효과가 포켓 선단 쪽의 압력 상승 효과를 발생 시키는 데 모델에 있어 기본 적용은 유동이 선단에 의한 압력 피크로 램 압력효과(ram pressure effect)를 발생 시키고 또한 좁은 랜드부의 입구 선단으로 다시 나가는 과정에서의 에너지 변환에 따른 관성 효과가 식(3), 식(4)로 표현된다.

$$Pe^- = P_r + \mu K \frac{\eta^2}{C^2} \left[\bar{U} \eta - \frac{R \Omega}{2} \right] \cdot \frac{b}{2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Pe^+ &= Pe^- - \left(\frac{\rho}{2} \right) \left(1 + \frac{1.95}{R_H^{4.3}} \right) (1 + \xi_x) (1 - \eta^2) \bar{U}^2 \bar{U} \cdot n > 0 \\ &= Pe^- \left(\frac{\rho}{2} \right) \left(1 + \frac{1.95}{R_H^{4.3}} \right) (1 + \xi_x) (1 - \eta^2) \bar{U}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

포켓 내부의 오리피스스를 통하여 주입되는 윤활류는 주입되는 각도에 따라 원주 방향의 모멘트 변화를 유발 시킨다. Fig. 2에서와 같이 α 의 각도로 주입되는 유체의 모멘트의 변화에 따른 압력 구배에 대한 해석 모델은 포켓 내의 유동이 역류(reversive flow)가 없는 1차원 유동이란 가정하에 검사 체적(control volume) 내의 모멘트는 식(5)로 표현된다.

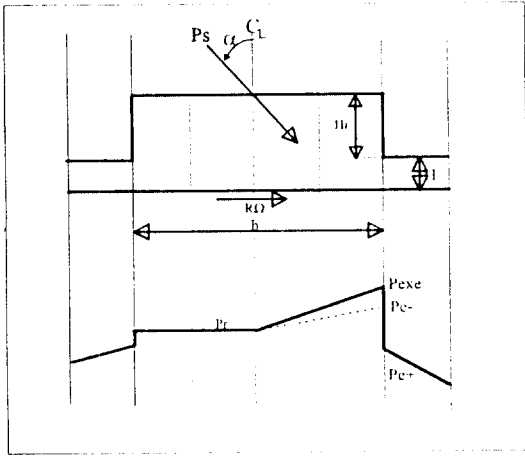


Fig. 2. Model of pressure distribution at hybrid bearing pocket.

$$\sum_{C.V} (M_{in} - M_{out}) = 0 \quad (5)$$

실제 해석에 있어 식 (5)는 다시 식 (6)과 같이 표현이 가능하다.

$$\Delta P_{EX}(\text{exchange of momentum}) = \frac{(\rho_0 A_0 V_0) * V_0 \sin \alpha}{h_p * l} = \frac{2 * A_0}{h_p * l} * (P_s - P_r) * \sin \alpha \quad (6)$$

포켓내의 모멘트 변화에 의한 압력 강하는 오리피스 입사 각도인 α 에 따라 달라지는데 $\alpha=90^\circ$ 일 경우 최대의 압력 변화가 발생한다. 또한 일반 베어링의 입사 각도인 $\alpha=0^\circ$ 는 모멘트 변화에 의한 압력 구배가 발생하지 않음을 알 수 있다. 실제 오리피스의 분사는 노즐의 직경, 분사면사이의 거리 그리고 분사 속도에 따라 압력 구배의 변화가 다르다. 본 연구에서는 분사면에서 모멘트 변화에 기인한 압력 구배의 변화가 최대가 되고 포켓의 길이 방향 끝단에서는 그 효과가 없는 선형함수로 가정하였다.

3. 수치 해석

이차원 타원 미분 방정식(elliptic equation)인 식(1)의 미분방정식의 해법은 유한차분법(finite difference method)에 의하여 수치적으로 해를 구할 수 있는데 이러한 과정 중 식(1)을 다음과 같이 무차원화하면 식(7)과 같이 표현되어진다.

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (G_\theta H^3 \frac{\partial P}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (G_\zeta H^3 \frac{\partial P}{\partial \zeta}) = \Lambda \frac{\partial H}{\partial \theta} + \sigma \frac{\partial H}{\partial \tau} \quad (7)$$

여기서 유막 두께, 축방향 길이, 압력, 저널 속도, 시간 및 원주 방향 길이에 대한 각각의 무차원화 된 변수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H &= \frac{h}{C} = (1 + \epsilon \cos \theta) & \zeta &= \frac{z}{R} \\ P &= \frac{P}{P_a} & U &= R \Omega \\ \tau &= \alpha & \theta &= \frac{x}{R} \end{aligned} \quad (8)$$

또한 베어링 정수 (bearing number) Λ 와 스퀴즈 정수 (squeeze number)는 다음과 같이 무차원화 된 식으로 표현이 가능하다.

$$\text{Bearing Number} : \Lambda = 6 \frac{\mu}{P_a} \frac{R^2}{C^2} \Omega \quad (9)$$

$$\text{Squeeze Number} : \sigma = 12 \frac{\mu}{P_a} \frac{R^2}{C^2} \omega \quad (10)$$

위의 무차원화된 식 (7)은 난류 영역에서의 적용이 가능한 수정된 레이놀즈 방정식으로 정상상태의 평형점 (steady state equilibrium) 만을 고려 할 때 시간에 따른 항은 생략이 가능하다.

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (G_\theta H^3 \frac{\partial P}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (G_\zeta H^3 \frac{\partial P}{\partial \zeta}) = \Lambda \frac{\partial H}{\partial \theta} \quad (11)$$

이제 렌드부의 무차원화된 식 (11) 대하여 유한 차분법을 적용하기 위한 격자점을 Fig. 3과 같이 구성한다. 무차원화된 식 (9)의 임의의 점 i, j 에서의 압력을 해석하기 위하여 점 i, j 를 둘러싼 빗금친 곳에서의 압력 $P_{i,j}$ 로 가정하였고 축간의 틈새 H 는 점선의 교차점으로 하였다.

오리피스를 통과하는 유량에 대한 평형식은 다음과 같이 식(12)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} K_B \frac{\mu}{C^3 \sqrt{P_a}} \sqrt{P_s - P_r} &= \frac{1}{G_\theta} \int_\zeta^{\zeta'} (P_s - P_r) H^3 \frac{d\zeta}{d\theta} \\ &+ \frac{1}{G_z} \int_\theta^{\theta'} (P_s - P_r) H^3 \frac{d\theta}{d\zeta} \end{aligned} \quad (12)$$

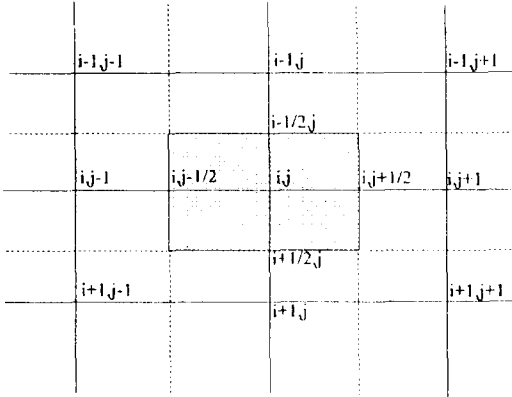


Fig. 3. Mesh for F.D.M. analysis.

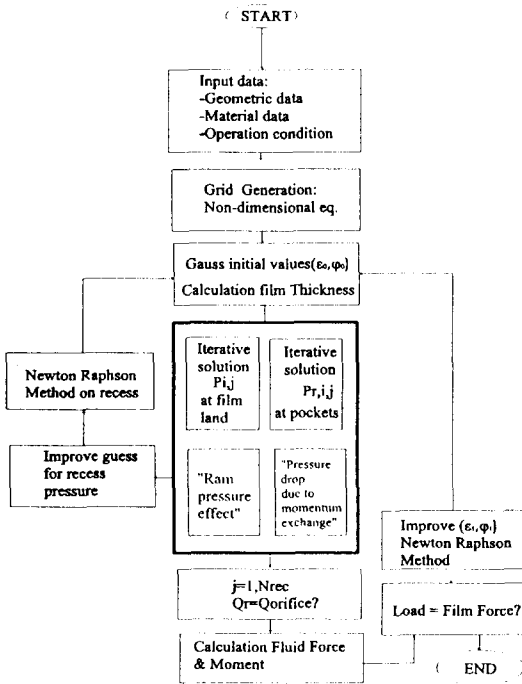


Fig. 4. Flow-chart for steady state convergence for hybrid journal bearing.

여기서 무차원 유량은 다음과 같다.

$$Q = K_B \frac{\mu}{C^3 \sqrt{P_a}} \sqrt{P_s - P_r}, \quad K_B = C_d A_0 \sqrt{2\rho} \quad (13)$$

본 연구의 수치 해석법은 유한 차분법을 근간으로 한 **SOR**(successive over-relaxation)법을 적용하였고 랜드

Table 1. Description of 3 recess hydrostatic water bearing studied experimentally by Chaomleffel and Nicholas (1986). Bearing geometry and operating conditions

Geometry :
Diameter=80 mm Length=80 mm
Recess 1 × b 50 mm × 62.83 mm Clearance Cr=0.125 mm
recess depth Hr=2 mm, 10 mm Orifice diameter d ₀ =4.1 mm
Fluid : Water at 20°C
Viscosity 0.01 Pa sec
Density : 1000 kg/m ³
Pressure Supply : 0.4 Mpa
Journal speed : 0~9000 rpm
Dimensionless Parameters :
Reynolds Numbers : Re _p =18773, Re* _p =58.66
Speed parameter : 0~0.246
Rotation Reynolds Number; 0~4618
L/D=1, l/L=.625, $\frac{Nb}{PD}=.75$, C/R=0.0031, Hr/Cr=16

부의 유막 압력 P_{ij} 의 수렴성은 $\sum_{ij} |P_{ij}^{(k)} - P_{ij}^{(k-1)}| < 10^{-7}$ 을 갖으며 포켓의 유량 평형에는 Newton Raphson법을 적용하였다. Fig. 4는 하이브리드 베어링의 전체적 해석을 위한 흐름도를 나타낸다.

4. 해석 결과 및 고찰

본 연구의 이론적 모델에 대 해석 결과를 비교 검증하고 하이브리드 포켓 내의 공급유의 입사 각도에 따른 내부압의 영향 및 베어링의 정적 특성 변화를 고찰하기 위하여 Chaomleffel과 Nicholas [12] 등이 세 개의 포켓을 갖는 정압 베어링에 대하여 실험한 결과와 비교하였다. Table 1은 ref. [12]의 실험에 사용되어진 데이터를 나타낸다.

베어링 내의 격자점 구성은 원주 방향으로 74개, 축의 길이 방향으로 17개로 구성하였다. Fig. 5는 편심량에 따른 베어링의 하중 지지능력을 도식화 한 것으로 축의 회전이 없는 경우 동압에 의한 효과가 전혀 발생하지 않으므로 강한 선형성을 띄며 하중의 부가 방향이 음(-)의 방향일 때도 역시 음(-)값의 편심률을 갖으며 역시 선형적 성격을 보이고 있다.

앞서 언급한 축의 회전에 의한 포켓 내부에서의 압력 상승 효과인 램 효과는 축의 회전 속도가 증가함에 따라 그 피크 값이 상승 됨을 알 수 있는데 이는 축의 회전에 기인한 유체의 전단에 의해 발생하는 압

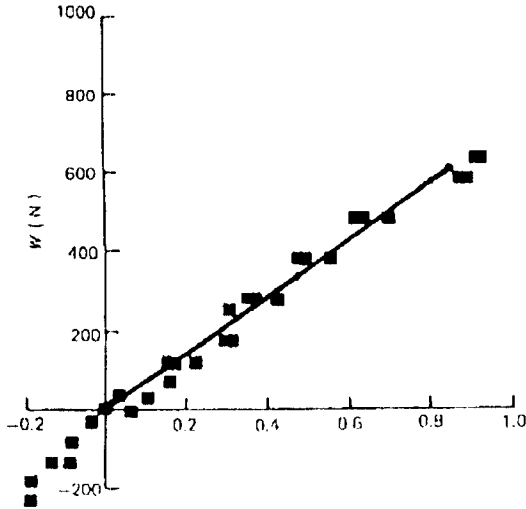


Fig. 5. Load variations against relative eccentricity. Experimental results of Chaomeleffel and Nicholas (1986) and predictions from present analysis (■: Experimental results of Chameleffel and Nicholas (1986), —: Present Analysis).

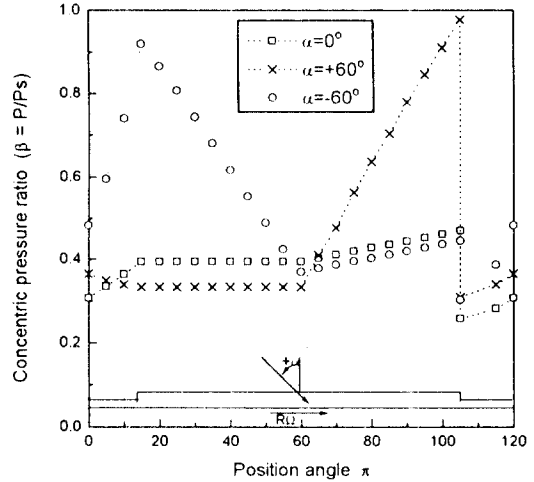


Fig. 7. Pressure ratio distribution change due to injection angle (20000 rpm $P_s=6000$ kPa).

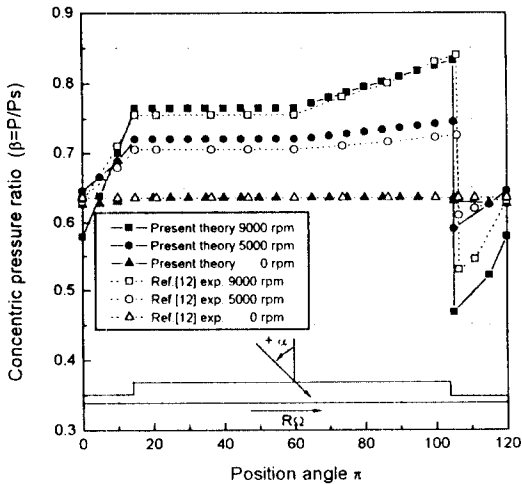


Fig. 6. Pressure ratio comparison of test results of Chaomeleffel and Nicholas (1986) with current prediction.

력 변화 효과이다. Fig. 6 은 0, 5000, 9000 rpm의 경우 ref. [12]의 실험 결과와 본 연구의 해석 결과를 비교한 것으로 그 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 7은 포켓 내의 오리피스의 분사각에 의한 내부 압력의 형상을 나타낸 것으로 입사각 $\alpha=0^\circ$ 인 경우 내

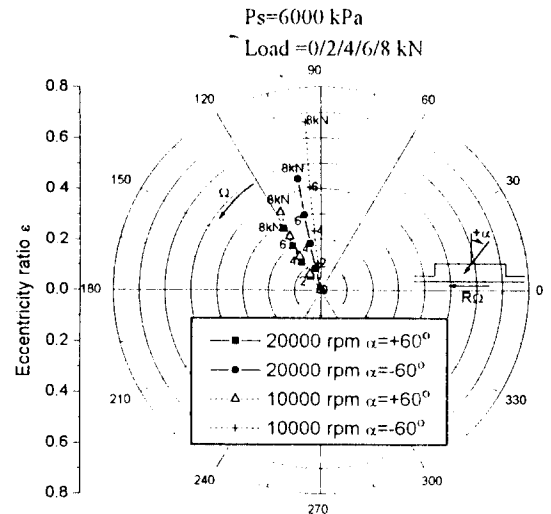


Fig. 8. Journal center locus (supply pressure 6000 kPa).

부압은 단순히 축의 회전에 기인한 램효과 만이 예측된다. 입사각 α 이 양(+)의 각도로 입사하는 경우 축의 회전 방향과 유동에 대한 입사 방향이 동일 할 때 포켓내에서는 램 효과 뿐만 아니라 입사각이 갖는 모멘트의 변화에 기인한 압력 변화가 발생한다. 이는 램 효과에 더해져 더욱 포켓 내부의 압력의 상승 작용 나타내고 그에 반하여 축의 회전에 의한 스월(swirl) 효과를 증대 시켜 시스템의 안정성을 악화 시킬 수도 있다. 그러나 입사각 α 가 음(-)의 각도로 입사하는 경

우는 축의 회전에 의한 스웰의 영향을 감소 시키지만 역시 모멘트 변화에 의한 압력 상승은 존재함을 알 수 있다.

Fig. 8은 공급 압력이 6000 kPa의 고압인 경우 각각의 하중(0/2/4/6/8 kN)에 따른 정적 하중 지지력을 편심률과 자세각에 따라 표시한 것으로 10000 rpm과 20000 rpm 모두 난류 영역에서의 해석과 베어링 포켓 선단에서의 관성력의 영향을 고려하였다.

축이 10000 rpm의 저속 회전 시 고하중 부가에 의한 편심률이 커질 경우 오리피스에 의한 정적 지지력의 차이가 발생하는데 최대 0.17정도의 편심률 차이를 보였으며 자세각 역시 10°이상의 차이를 보였다. 이는 포켓 내의 고압 분사에 의한 모멘트 변화가 압력구배에 영향을 미침을 시사한다. 그러나 20000 rpm의 경우 축의 회전에 의한 포켓의 내부압 상승이 있으므로 모멘트 변화에 의한 압력 구배의 변화가 둔감해진다. 따라서 베어링의 정적 하중 지지력의 변화가 10000 rpm에 비하여 상대적으로 작음을 알 수 있었다. 결과적으로 포켓 내의 유동에 따른 압력 발생의 형태 중 입사각 모멘트 변화에 따른 압력구배의 변화 폭은 축의 저속 회전 시 고압의 공급압으로 고 하중에 의한 편심이 클 수록 그 효과는 커짐을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 경사각을 지니고 입사하는 하이브리드 베어링의 포켓내 유동 형태를 표현하기 위하여 단순화한 모델을 정립하고, 축의 고속 회전에 의한 동압 효과로 발생하는 램 압력효과(ram pressure effect) 및 관성 효과를 고려한 해석을 수행 하였다. 아울러 입사각 및 입사 압력의 세기에 따른 모멘트 변화가 내부 압력구배에 미치는 영향을 고찰하고 또한 이것이 베어링의 정적 하중 지지 특성에 미치는 영향도 연구하였다.

그 결과 포켓 내의 유동에 따른 압력 발생의 형태 중 입사각 모멘트 변화에 따른 압력구배의 변화 폭은 축의 저속 회전 시 고압의 공급압으로 고 하중에 의한 편심이 클 수록 그 효과는 커짐을 알 수 있었다. 이를 고속으로 회전하는 하이브리드 베어링의 스웰 제어에 적용함으로써 보다 효과적인 베어링 설계 자료로 활용이 가능하고 특히 제어 미케니즘을 적용하여 고속

회전시 발생하는 로터의 공진 및 불안정성에 대응할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 추후 이에 대한 지속적 연구 및 동 특성의 영향등에 대한 세부적 연구 계획이 예정되어있다.

참 고 문 헌

1. Tondl, A., "Bearings with a Tangential Gas Supply," University of Southampton, Department of Mechanical Engineering, Gas Bearing Symposium, paper no.4, 1967
2. Muszynska, A., Franklin, W.D., and Bently, D.E., "Rotor Active "Anit-Swirl" Control," ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol.110, pp143-150, 1988
3. Muszynska, A. and Bently, D.E., "Anti-Swirl Arrangements Prevent Rotor/Seal Instability," Transactions of AMSE, Vol.111, pp. 156-162, 1989
4. Luis San Andres, "Turbulent Hybrid Bearings with Fluid Inertia Effects," ASME J. of Tribology, pp699-707, 1990.
5. Kurtin, K.A., Childs, D., San Andres, L., and Hale, K., "Experimental Versus Theoretical Characteristics of a High-Speed Hybrid (Combination Hydrostatic and Hydrodynamic) Bearing," ASME Paper 91-Trib-35, 1991.
6. V.N. Constantinescu, S. Galetuse, "Pressure Drop Due to Inertia Forces in Step Bearings," ASME paper Lub.-34, pp 1-8,1975.
7. Hirs, G.G., "A Bulk Flow Theory for Turbulence in Lubricant Films," ASME, Journal of Lubrication Technology, pp. 173-146, 1973
8. Nelson, C.C, and Nguyen, D.T., "Comparison of Hir's Equation with Moddy's Equation for Determining Rotor dynamic Coefficients of Annular Pressure Seal," ASME Journal of Lubrication Technology, Vol, 109, pp. 144-148, 1987.
9. C.H. Kim and Y.B.Lee, "Test Results for Rotordynamic Coefficients of Anti-Swirl Self-Injection Seals," ASME Journal of Tribology, Vol.116, pp508-513, 1994.
10. Chang-Ho Kim, Yong-Bok Lee and Dong-Hoon Choi, A Test Apparatus and Preliminary Test Results Rotordynamic Coefficients of a Swirl-Controlled Hybrid Bearing. The Eighth Workshop on Rotordynamic Ins-

- tability Problems in High Performance Turbomachinery, May, 6, 1996.
11. 김창호, 이용복, 스월 제어형 유정 동압 지능 베어링, 대한민국 특허, 1996년. 4월.(출원중)
 12. Chaomleffel, J.P., and Nicholas, D., "Experimental Investigation of Hybrid Journal Bearing," Tribology International, Vol.19, No.5, pp. 253-259, 1986.