

## 공기정압 베어링의 정 동특성에 관한 연구

전경석\* · 한동철\*\*

\*서울대학교 대학원 기계설계학과

\*\*서울대학교 기계설계학과

### Static and Dynamic Characteristics of Aerostatic Gas Bearing

Kyung Suk Jeon\*, Dong Chul Han\*\*

\*Graduate School of Seoul National University

\*\*Seoul National University

#### 1. 서 론

최근 전자 및 광학 분야에 있어서의 눈부신 발전은 다면경 가공이나 초정밀 연삭기와 같은 초정밀 가공 기계의 개발과 실용화에 힘입은 바 크다. 이러한 초정밀 가공기의 성능을 좌우하는 핵심 요소로서 주축계를 들 수 있으며, 비교적 소형 경량의 공작물을 가공하는 기계의 주축용 베어링으로는 오일 베어링을 대신하여 공기 베어링이 점차 널리 사용되고 있다.

이러한 가공기에 많이 사용되는 외부 가압 공기 베어링은 동압 공기 베어링과는 달리, 외부에서 가압된 압축공기에 의하여 공기막을 형성하므로, 시동과 정지 시 마찰이 없고 저속에서도 비교적 높은 하중 지지력을 얻을 수 있으며, 오일 베어링과 비교하여서는 발열이 적고 윤활제의 유출에 의한 오염의 위험이 없다는 특성외에 공기막에 의한 평균화 효과에 의하여 고정도의 운전이 가능하다는 장점이 있다.

고속 정밀 주축은 불안정성이 나타나지 않는 영역에서 사용되는 것이 보통이므로, 설계시에는 베어링 부하용량 및 소요유량 등의 정적인 특성수와 베어링의 강성과 같은 동적인 특성들이 최적치를 갖도록 해석하는 것이 중요하다.

이론적인 해석을 바탕으로 한 설계자료로는 MTI 설계 도표<sup>1,2)</sup>가 가장 널리 알려져 있고 최근까지의 연구 결과는 Gross<sup>3)</sup>에 의해 정리된 바 있다. 위의 자료에

인용된 연구는 선급기원(line source) 가정에 근거를 둔 해석이 주류를 이루고 있으나, 선급기원에 의한 모델링은 급기공 하에서의 원주 방향 유동을 정확히 고려하지 못하므로 최근에는 실제의 거동에 보다 가까운 점급기공의 가정에 의한 해석이 이루어지고 있다.

점급기공의 가정을 이용한 해석 방법으로는 각 급기공 사이의 영향 계수를 이용하는 방식,<sup>4)</sup> 지배 방정식을 차분화하고, 급기량의 영향을 차분 방정식에 대입하는 방식<sup>5,6)</sup> 등이 있으나 본 논문에서는 윤활 틈새 내의 질량 유동의 연속성을 이용하여 해를 구하는 직접 수치 해법(Direct Numerical Method)를 이용하였다. 공기 베어링 문제에 있어서, 직접 수치 해법은 가장 효율적인 해법이나<sup>7)</sup> 최근까지는 주로 극소 공기막을 갖는 윤활문제에 적용되어 왔다.<sup>8)</sup>

베어링의 제 특성수들은 압력 분포에 근거를 두고 있으므로 압력 분포의 정확한 계산은 베어링의 성능을 예측하는데 가장 중요하다. 자성형(inherently restricted) 급기공을 갖는 외부 가압 베어링에서는 입구효과(Entrance effect)라 불리는 급격한 압력 강하 현상이 발생하나, 틈새가 비교적 작은 경우에는 점성 유동에 의한 모델도 잘 맞는 것으로 알려져 있다.<sup>9)</sup>

본 연구에서는 점급기원의 가정하에 직접 수치해법을 사용하는 해석 프로그램을 작성하여, 무차원화된 설계 변수들에 대한 외부가압 공기베어링의 정·동특성수들을 구하고자 한다.

## 2. 외부가압 공기 베어링의 해석

### 2-1. 레이놀즈 방정식의 이산화

회전축을 지지하는 미끄럼 베어링의 윤활 틈새내에 발생하는 압력분포는 레이놀즈 방정식으로 그 특성을 나타낼 수 있다. 압축성 유체를 윤활제로 사용하는 정상 상태의 유체 윤활에 대한 레이놀즈 방정식은 다음과 같다.<sup>3)</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x}[\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial z}[\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial z}] = 6\mu U \frac{\partial}{\partial x}(\rho h) \quad (2-1)$$

여기서, 윤활제인 공기를 이상 기체로 가정하면

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (2-2)$$

따라서

$$\frac{\partial}{\partial x}[ph^3 \frac{\partial p}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial z}[ph^3 \frac{\partial p}{\partial z}] = 6\mu U \frac{\partial}{\partial x}(ph) \quad (2-3)$$

식 (2-3)을 다음과 같이 베어링의 설계변수들에 대하여 무차원화 한다.

$$\theta = x/r, \quad \zeta = z/r, \quad P = p/p_a$$

$$\omega = U/r, \quad H = h/C, \quad \psi = C/r$$

$$\Lambda = \frac{6\mu\omega}{p_a\psi^2} \quad (2-4)$$

따라서

$$\frac{\partial}{\partial \theta}(PH^3 \frac{\partial P}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(PH^3 \frac{\partial P}{\partial \zeta}) = \Lambda \frac{\partial}{\partial \theta}(PH) \quad (2-5)$$

식 (2-5)를 벡터를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (PH^3 \Delta P - \underline{\Lambda} PH) = 0 \quad (2-6)$$

식 (2-6)을 그림 2-1에서와 같이 공기 윤활이 이루어지는 표면상의 임의의 점 (i, j)를 둘러싼 검사 표면  $\sum_{ij}$ 에 대하여 적분한다.

$$\iint_{\sum_{ij}} \nabla \cdot (PH^3 \Delta P - \underline{\Lambda} PH) d\theta d\zeta = 0 \quad (2-7)$$

이 때,  $\nabla$ 와 벡터 $\underline{\Lambda}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \mathbf{j}$$

$$\underline{\Lambda} = \Lambda \mathbf{i} \quad (2-8)$$

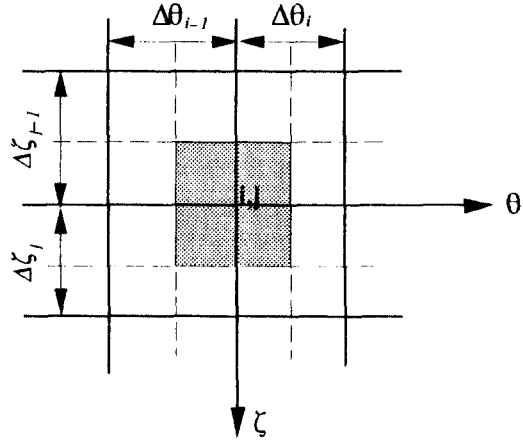


Fig. 2-1. Configuration of control surface for arbitrary grid point.

식 (2-7)에 Gauss' Divergence Theorem을 적용하면

$$\int_{\Gamma_{ij}} (PH^3 \Delta P - \underline{\Lambda} PH) \cdot \mathbf{n} dl = 0 \quad (2-9)$$

식 (2-8)을 다음과 같이 이산화(Discretization) 한다.

$$\begin{aligned} & \{ (PH^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} - \underline{\Lambda} PH)_{i+1/2, j+} \cdot \frac{\Delta \zeta_{j+1}}{2} \\ & + (PH^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} - \underline{\Lambda} PH)_{i+1/2, j-} \cdot \frac{\Delta \zeta_j}{2} \} \\ & + \{ (PH^3 \frac{\partial P}{\partial \zeta})_{i+, j+1/2} \cdot \frac{\Delta \theta_{i+1}}{2} + (PH^3 \frac{\partial P}{\partial \zeta})_{i-, j+1/2} \cdot \frac{\Delta \theta_i}{2} \} \\ & - \{ (PH^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} - \underline{\Lambda} PH)_{i-1/2, j+} \cdot \frac{\Delta \zeta_{j+1}}{2} \\ & + (PH^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} - \underline{\Lambda} PH)_{i-1/2, j-} \cdot \frac{\Delta \zeta_j}{2} \} \\ & - \{ (PH^3 \frac{\partial P}{\partial \zeta})_{i+, j-1/2} \cdot \frac{\Delta \theta_{i+1}}{2} \} \\ & + \{ (PH^3 \frac{\partial P}{\partial \zeta})_{i-, j-1/2} \cdot \frac{\Delta \theta_i}{2} \} = 0 \end{aligned} \quad (2-10)$$

여기서, 첨자 (i+, j+1/2)와 (i-, j+1/2)는 각각 (i, j+1/2)점에서 +θ와 -θ쪽의 값을 표시한다.

식 (2-9)로부터 중앙 차분식(central difference formula)에 의하여 다음과 같은 근사식이 유도된다.

$$P_{i+1/2, j} \{ H_{i+1/2, j}^3 + (P_{i+1, j} - P_{i, j}) \frac{1}{\Delta \theta_{i+1}} \}$$

$$\begin{aligned}
& -\Lambda H_{i+1/2,j+} \cdot \frac{\Delta \zeta_{j+1}}{2} \\
& + P_{i+1/2,j} \left( H_{i+1/2,j}^3 - (P_{i+1,j} - P_{i,j}) \frac{1}{\Delta \theta_{i+1}} \right. \\
& \quad \left. - \Lambda H_{i+1/2,j-} \cdot \frac{\Delta \zeta_j}{2} \right. \\
& + P_{i,j+1/2} H_{i+1/2,j+1/2}^3 (P_{i,j+1} - P_{i,j}) \frac{1}{\Delta \zeta_{j+1}} \cdot \frac{\Delta \theta_{i+1}}{2} \\
& + P_{i,j+1/2} H_{i-1/2,j+1/2}^3 (P_{i,j+1} - P_{i,j}) \frac{1}{\Delta \zeta_{j+1}} \cdot \frac{\Delta \theta_i}{2} \\
& - P_{i-1/2,j} \left( H_{i-1/2,j}^3 - (P_{i,j} - P_{i-1,j}) \frac{1}{\Delta \theta_i} \right. \\
& \quad \left. - \Lambda H_{i-1/2,j+} \cdot \frac{\Delta \zeta_{j+1}}{2} \right. \\
& - P_{i-1/2,j} \left( H_{i-1/2,j}^3 - (P_{i,j} - P_{i-1,j}) \frac{1}{\Delta \theta_i} \right. \\
& \quad \left. - \Lambda H_{i-1/2,j-} \cdot \frac{\Delta \zeta_j}{2} \right. \\
& - P_{i,j-1/2} H_{i+1/2,j-1/2}^3 (P_{i,j} - P_{i,j-1}) \frac{1}{\Delta \zeta_j} \cdot \frac{\Delta \theta_{i+1}}{2} \\
& - P_{i,j-1/2} H_{i-1/2,j-1/2}^3 (P_{i,j} - P_{i,j-1}) \frac{1}{\Delta \zeta_j} \cdot \frac{\Delta \theta_i}{2} = 0
\end{aligned} \tag{2-11}$$

식 (2-11)을 다음과 같이 정리한다.

$$\begin{aligned}
& (C_1 + C_2 + C_3 + C_4) P_{i,j} \\
& = C_1 P_{i+1,j} + C_2 P_{i,j+1} + C_3 P_{i-1,j} + C_4 P_{i,j-1} - C_5 + C_6
\end{aligned} \tag{2-12}$$

$$C_1 = \frac{P_{i+1/2,j}}{2\Delta\theta_{i+1}} (H_{i+1/2,j+}^3 \cdot \Delta\zeta_{j+1} + H_{i+1/2,j-}^3 \cdot \Delta\zeta_j)$$

$$C_2 = \frac{P_{i,j+1/2}}{2\Delta\zeta_{j+1}} (H_{i+1/2,j+1/2}^3 \cdot \Delta\theta_{i+1} + H_{i-1/2,j+1/2}^3 \cdot \Delta\theta_i)$$

$$C_3 = \frac{P_{i-1/2,j}}{2\Delta\theta_i} (H_{i-1/2,j+}^3 \cdot \Delta\zeta_{j+1} + H_{i-1/2,j-}^3 \cdot \Delta\zeta_j)$$

$$C_4 = \frac{P_{i,j-1/2}}{2\Delta\zeta_j} (H_{i+1/2,j-1/2}^3 \cdot \Delta\theta_{i+1} + H_{i-1/2,j-1/2}^3 \cdot \Delta\theta_i)$$

$$C_5 = \frac{\Lambda P_{i+1/2,j}}{2} (H_{i+1/2,j+} \cdot \Delta\zeta_{j+1} + H_{i+1/2,j-} \cdot \Delta\zeta_j)$$

$$C_6 = \frac{\Lambda P_{i-1/2,j}}{2} (H_{i-1/2,j+} \cdot \Delta\zeta_{j+1} + H_{i-1/2,j-} \cdot \Delta\zeta_j)$$

급기공에 위치한 절점에 대하여는

$$\int_{\Gamma_{i,j}} (PH^3 \Delta P - \Lambda PH) \cdot \mathbf{n} dl + Q_{sij} = 0 \tag{2-13}$$

이므로

$$\begin{aligned}
& (C_1 + C_2 + C_3 + C_4) P_{i,j} \\
& = C_1 P_{i+1,j} + C_2 P_{i,j+1} + C_3 P_{i-1,j} + C_4 P_{i,j-1} - C_5 + C_6 \\
& \quad + Q_{sij}
\end{aligned} \tag{2-14}$$

이다. 여기서 Fig. 2-2와 같은 자성형 급기공으로부터 공급되는 급기량  $q_{sij}$ 는 압축성 유체의 등 엔트로피 과정에 대한 식으로부터 구한다.<sup>10)</sup>

$$q_{sij} = C_D \cdot \pi d_s h_{i,j} \cdot \frac{p_s}{\sqrt{RT}} \left[ \frac{2\kappa}{\kappa+1} \right]^{1/2} \left[ \frac{2}{\kappa+1} \right]^{1/\kappa-1},$$

$$\frac{p_{i,j}}{p_s} \leq \left[ \frac{2}{\kappa+1} \right]^{\kappa/\kappa-1}$$

$$q_{sij} = C_D \cdot \pi d_s h_{i,j} \cdot \frac{p_s}{\sqrt{RT}} \left[ \frac{2\kappa}{\kappa-1} \right]^{1/2} \left[ \frac{p_{i,j}}{p_s} \right]^{2/\kappa}$$

$$- \left( \frac{p_{i,j}}{p_s} \right)^{\kappa+1/\kappa} \right]^{1/2}, \quad \frac{p_{i,j}}{p_s} > \left[ \frac{2}{\kappa+1} \right]^{\kappa/\kappa-1}$$

(2-15)

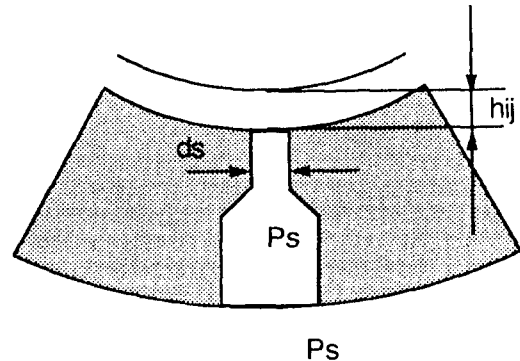


Fig. 2-2. Geometry of inherent restrictor.

식 (2-15)를 지배 방정식과 같이 무차원화 한다.

$$Q_{s,i,j} = \frac{12\mu RT}{p_a^2 C^3} \cdot q_{s,i,j} \quad (2-16)$$

이때 자성형 급기공의 기준 급기면적  $A_0$ 은 아래와 같다.

$$A_0 = \pi \cdot d_s \cdot C \quad (2-17)$$

여기서 무차원 급기 계수  $\Gamma_s$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\Gamma_s = \frac{12\mu C_0 A_0 \sqrt{RT}}{p_a C^3} \quad (2-18)$$

따라서 식 (2-15) 및 (2-16)은 다음과 같이 무차원 변수들로 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{s,i,j} &= \Gamma_s \cdot P_s \cdot H_{i,j} \cdot \left(\frac{2x}{x+1}\right)^{1/2} H_{i,j} \cdot \left(\frac{2x}{x+1}\right)^{1/2}, \\ \frac{P_{i,j}}{P_s} &\leq \left(\frac{2}{x+1}\right)^{\kappa/\kappa-1} \\ &= \Gamma_s \cdot P_s \cdot H_{i,j} \cdot \left(\frac{2x}{x-1}\right)^{1/2} \left[\left(\frac{P_{i,j}}{P_s}\right)^{2/\kappa}\right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{P_{i,j}}{P_s}\right)^{\kappa+1/\kappa}\right]^{1/2}, \quad \frac{P_{i,j}}{P_s} > \left(\frac{2}{x+1}\right)^{\kappa/\kappa-1} \end{aligned} \quad (2-19)$$

### 2-2. 외부 가압 공기 베어링의 모델링

축의 기울어짐이 없다고 가정하면, 틈새는  $\theta$ 만의 함수이다. Fig. 2-3과 같은 진원형 베어링에서  $e \ll r$ 이면, 저어널이 하중을 받아 자세각  $\phi$ 를 이루며 편심량  $e$ 만큼 편심된 경우 윤활 틈새의 함수는

$$h(\theta) = C - e \cdot \cos(\theta - \phi) \quad (2-20)$$

로 표시할 수 있다. 지배 방정식과 마찬가지로 무차원한다.

$$H = h/C = 1 - \epsilon \cdot \cos(\theta - \phi) \quad (2-21)$$

식 (2-21)에 의하여 각 절점에서의 윤활 틈새가 얻어지면 각 검사 표면의 경계에서의 윤활 틈새는 평균 계단 틈새 함수(mean-step film thickness function)의 가정에 의하여 구하여 진다. 이 방식은 베어링 표면에 그루브(groove)와 같은 틈새 변화의 요인이 있을 경우에도 응용할 수 있다. 위의 가정에 의해 Fig. 2-4에 표시된 임의의 절점에 대하여 다음과 같은 관계가 성립한다.

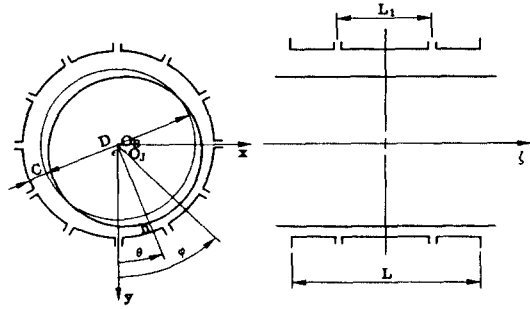


Fig. 2-3. Schematics of externally-pressurized journal bearing.

$$\begin{aligned} H_{i+1/2,j+} &= \frac{H_{i+1,j(2,1)} + H_{i,j(2,2)}}{2}, \\ H_{i+,j+1/2} &= \frac{H_{i,j+1(2,1)} + H_{i,j(2,2)}}{2}, \\ H_{i+1/2,j-} &= \frac{H_{i+1,j(1,1)} + H_{i,j(2,1)}}{2}, \\ H_{i-,j+1/2} &= \frac{H_{i,j+1(1,1)} + H_{i,j(1,2)}}{2}, \\ H_{i-1/2,j+} &= \frac{H_{i,j(1,2)} + H_{i-1,j(2,2)}}{2}, \\ H_{i+,j-1/2} &= \frac{H_{i,j(2,1)} + H_{i,j-1(2,2)}}{2}, \\ H_{i-1/2,j-} &= \frac{H_{i,j(1,1)} + H_{i-1,j(2,1)}}{2}, \\ H_{i-,j-1/2} &= \frac{H_{i,j(1,1)} + H_{i,j-1(1,2)}}{2} \end{aligned} \quad (2-22)$$

베어링 내부의 압력분포를 계산하기 위해 압력의 경계조건이 필요하다. 베어링 경계면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{양단에서의 대기압 조건: } P_{i,n} &= 1 \\ \text{베어링 중앙에서의 축방향 대칭조건: } P_{i,1} &= P_{i,-1} \\ \text{압력의 원주방향 연속성: } P_{m,j} &= P_{0,j} \end{aligned} \quad (2-23)$$

위의 경계조건을 이용하여 식 (2-12)와 식 (2-14)로 표시되는 연립방정식을 풀어 윤활면위의 모든 절점에서의 압력분포를 구할 수 있다.

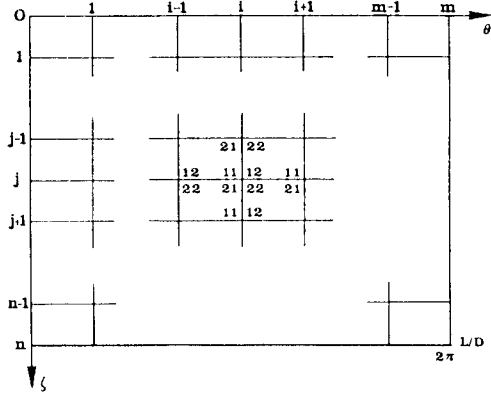


Fig. 2-4. Configuration of meshes for numerical analysis.

2-3. 외부가압 공기 베어링의 특성

공기막의 압력에 의하여 축의 중심에 작용하는 반력은 베어링 표면의 미소 면적에 작용하는 힘을 베어링 표면 전체에 걸쳐서 적분한 것과 같다. 따라서 Fig. 2-5와 같은 좌표계에 의한 반력의 성분들은 다음과 같다.

$$F_x = \int_0^{2\pi} \int_{-L/2}^{L/2} (p - p_a) \sin \theta \cdot r \cdot dz \, d\theta$$

$$F_y = \int_0^{2\pi} \int_{-L/2}^{L/2} (p - p_a) \cos \theta \cdot r \cdot dz \, d\theta \quad (2-24)$$

축방향 대칭성을 고려하여 식 (2-24)를 무차원화 한다.

$$\bar{F}_x = \frac{F_x}{p_a L D} = \frac{1}{2 \cdot L/D} \int_0^{2\pi} \int_0^{L/D} (P-1) \sin \theta \, d\zeta \, d\theta$$

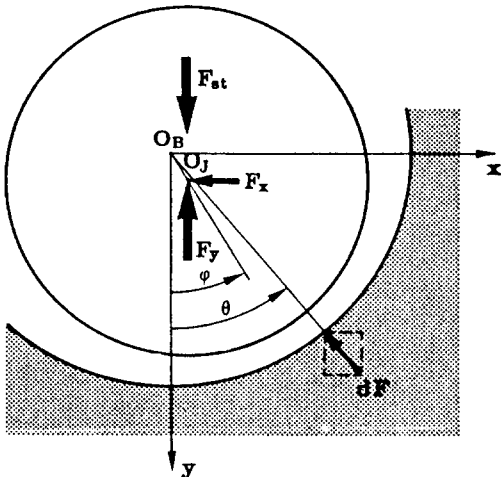


Fig. 2-5. Components of resultant of pressure.

$$\bar{F}_y = \frac{F_y}{p_a L D} = \frac{1}{2 \cdot L/D} \int_0^{2\pi} \int_0^{L/D} (P-1) \cos \theta \, d\zeta \, d\theta \quad (2-25)$$

따라서 무차원 베어링 반력은

$$\bar{F} = \frac{F}{p_a L D} = [(\bar{F}_x)^2 + (\bar{F}_y)^2]^{1/2} \quad (2-26)$$

이고, 이 반력 F의 y축에 대한 작용각은

$$\phi_p = \tan^{-1} (\bar{F}_x / \bar{F}_y) \quad (2-27)$$

압축성 계수  $\Lambda$ 와 계수  $\Gamma_s$ , 급기 압력  $P_s$ 가 일정할 때, 합력  $\bar{F}$ 와 작용각  $\phi_p$ 는 편심률  $\epsilon$ 의 함수이다. 보통 정적 평형상태에서 무차원 정하중  $\bar{F}_y$ 는 y방향으로 작용하며, 이는 반력  $\bar{F}$ 의 작용각  $\phi_p$ 가 0이고, 압력의 x방향 성분의 합이 0이 되어야 함을 의미한다.

$$\phi_p = 0, \bar{F}_x = 0 \quad (2-28)$$

따라서 위의 조건을 이용하면, 정적 평형을 만족하는 임의의 편심률  $\epsilon$ 에 대한 자세각  $\phi$ 를 반복 계산에 의해 구할 수 있다. 위의 식에 뉴턴 알고리즘을 적용하면

$$\phi^{(1)} = \phi^{(0)} - \phi_p^{(0)}$$

$$\phi^{(\nu+1)} = \phi^{(\nu)} - \phi_p^{(\nu)} \cdot \frac{\phi^{(\nu)} - \phi^{(\nu-1)}}{\phi_p^{(\nu)} - \phi_p^{(\nu-1)}} \quad \nu \geq 1 \quad (2-29)$$

그러므로 정적 평형상태에서 베어링 반력은 압력의 y방향 총합과 같으며, 무차원 정하중과 평형을 이루게 된다.

$$\bar{F}_{st} = \frac{F_{st}}{p_a L D} = \bar{F} = \bar{F}_y \quad (2-30)$$

베어링의 무차원 강성은 다음과 같이 정의된다.

$$K = \frac{\Delta \bar{F}_{st}}{\Delta \epsilon} \quad (2-31)$$

따라서 하중의 미소한 변화에 대한 편심률의 변화를 구함으로써 강성을 구할 수 있다.

2-4. 무차원 정특성 해석의 결과

외부가압 공기 베어링의 편심률이 작을 때, 무차원 하중 지지력은 편심률에 따라 선형적으로 변화하며, 무차원 유량은 편심률의 영향을 거의 받지 않는다. 따라서 편심률에 대한 무차원 하중지지력의 변화율, 즉 무차원 정적 강성과 무차원 유량은 편심률에 관계없이 일정한 값을 갖는 것으로 볼 수 있다.

급기 압력, 급기계수, 편심률이 일정할 때, 일반적으로 무차원 정적 강성은 압축성 계수  $\Lambda=0$ 에서 최소 값이 나타나고 압축성계수가 증가함에 따라 동압의 효과에 의해 증가하며, 무차원 유량은  $\Lambda=0$ 일 때의 최대값으로부터 미소하게 감소하는 경향을 보인다. 보통 베어링을 설계할 때에는 주어진 기하학적인 형상, 크기와 운전 조건에서의 최소 강성과 최대 소요유량을 예측하는 것이 중요하므로 설계 자료로서는 압축성계수가 0일 때, 여러가지 급기압력과 급기공의 갯수, 급기계수에 대한 무차원 강성과 유량의 변화를 비교하였다.

Fig. 2-7은 급기공의 갯수가 12개일 때 회전수가 각 0,3000,6000 rpm일 때의 편심률과 무차원 하중지지 용량에 대한 관계를 나타낸 것이다. 무차원 하중 지지력은 편심률에 따라 선형적으로 변화하며, 회전속도가 증가함에 따라 하중지지 용량이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 2-8부터 2-10까지는 각각 급기공의 갯수가 6, 8, 12일 때 급기계수에 대한 무차원 강성의 관계를 나타낸 것이다. 급기계수가 증가함에 따라 무차원 강성은 점차 증가하나, 급기계수가 대단히 클 경우에는 오히려 감소하는 경향을 보인다. 따라서 일정한 급기압력과 급기공의 갯수에 대하여 급기계수를 구성하는 베어링의 설계변수들에 최대의 강성을 얻을 수 있는 조합이 존재함을 알 수 있다. 그러므로 높은 정적 강성을 얻기 위해서는 우선 급기 압력과 급기공의 갯수를 크게 할 필요가 있으며, 이 두 가지 값이 결정되면 급기계수를 구성하는 설계 변수들, 특히 급기 면적과 베어링 틈새를 조절하여 최대의 강성이 나타나는 급기계수의 값을 조합하여야 한다.

Fig. 2-11은 급기공의 갯수 4, 6, 8, 12와 무차원 급

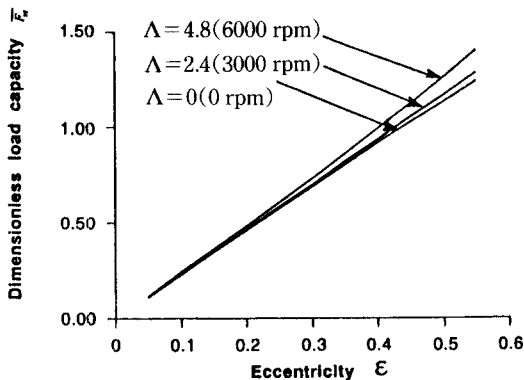


Fig. 2-7. Eccentricity vs dimensionless load capacity (n=12).

기압력 2, 3, 4, 5, 6에 대하여 급기계수와 급기공의 갯수의 곱과 무차원 유량사이의 관계를 나타낸 것이다. 선급기의 가정에 의한 해석의 경우에는 급기공의 갯수에 관계없이 일정한 관계를 지나나, 점급기원으로 해석한 결과,  $n \cdot \Gamma_s$ 의 값이 증가함에 따라 급기공의 갯수에 따라 유량에 차이가 발생하였다. 이러한 차이는 무차원 유량이 급기공의 수에 대하여 선형적으로 변화하지 않기 때문에 발생하며, 급기공의 수가 무한히 증가함에 따라 선급기원의 가정에 의해 해석한 결과에 접근하게 된다.

### 3. 결 론

외부가압 공기 정압베어링의 정·동특성을 이론적으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 외부가압 공기 베어링의 정적 특성수들은 직접 수치해법을 이용하여 효과적으로 계산할 수 있다.

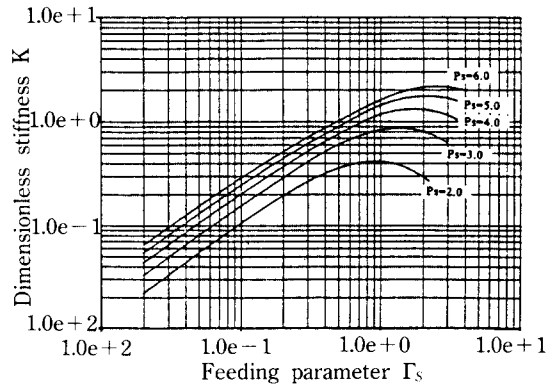


Fig. 2-8. Feeding parameter vs. dimensionless stiffness with  $L/D=1.0$ ,  $L_f/L=0.5$ ,  $A=0.0$ , and  $n=6$ .

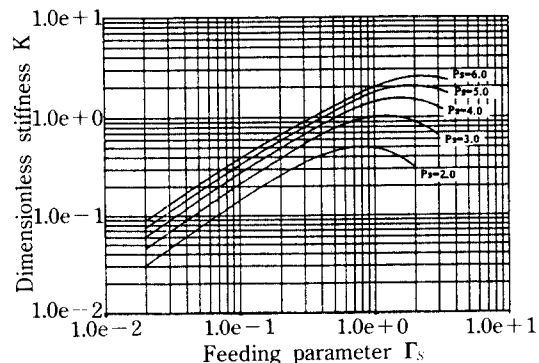
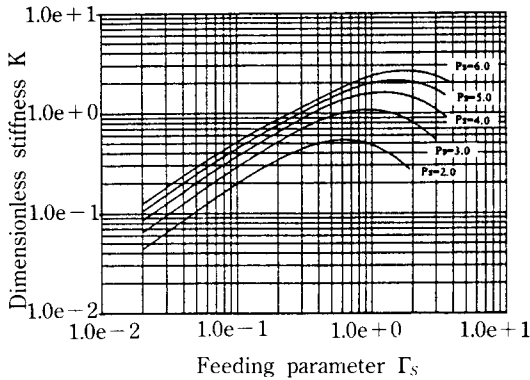


Fig. 2-9. Feeding parameter vs. dimensionless stiffness with  $L/D=1.0$ ,  $L_f/L=0.5$ ,  $A=0.0$ , and  $n=8$ .



**Fig. 2-10.** Feeding parameter vs. dimensionless stiffness with  $cL/D=1.0$ ,  $L_1/L=0.5$ ,  $A=0.0$ , and  $n=12$ .

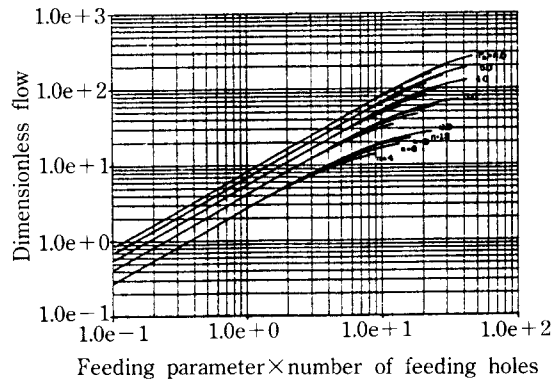
2. 무차원 정적 강성의 최대값이 나타나는 굽기계수가 존재하며, 이는 베어링의 설계변수들을 조합하여 얻을 수 있다.

#### 4. 후 기

본 연구는 현대 연구비의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드리는 바입니다.

#### Nomenclature

|                |   |
|----------------|---|
| $A_O$          | Reference curtain area of inherent restrictor |
| $C_D$          | Discharge coefficient                         |
| $d_S$          | Diameter of supply holes                      |
| $e$            | Eccentricity                                  |
| $F$            | Resultant of pressure                         |
| $\bar{F}$      | Dimensionless resultant of pressure           |
| $F_{st}$       | Static load                                   |
| $\bar{F}_{st}$ | Dimensionless static load                     |
| $h$            | Film thickness function                       |
| $h_O$          | Reference film thickness                      |
| $H$            | Dimensionless stiffness                       |
| $m$            | Number of grids in $\theta$ -direction        |
| $n$            | Number of grids in $\zeta$ -direction         |
| $p$            | Film pressure                                 |
| $P$            | Dimensionless film pressure                   |
| $p_a$          | Ambient pressure                              |
| $p_S$          | Supply pressure                               |
| $P_S$          | Dimensionless supply pressure                 |



**Fig. 2-11.**  $I_S$  vs. dimensionless flow with  $L/D=1.0$ ,  $L_1/L=0.5$ , and  $A=0.0$

|            |   |
|------------|---|
| $q_{sij}$  | Mass flow supplied through feeding hole               |
| $Q_{sij}$  | Dimensionless mass flow supplied through feeding hole |
| $R$        | Gas constant  |
| $T$        | Temperature of supplied gas                           |
| $\epsilon$ | Eccentricity ratio                                    |
| $\Gamma_S$ | Feeding parameter                                     |
| $k$        | Adiabatic number                                      |
| $\Lambda$  | Compressibility number                                |
| $\mu$      | Viscosity   |
| $\theta$   | Circumferential coordinate                            |
| $\zeta$    | Axial coordinate                                      |
| $\rho$     | Density   |
| $\omega$   | Angular velocity of journal                           |

#### References

1. Reiger, N.F. (ed.), 1967, "Design of Gas Bearings", RFP-MTI Gas Bearing Design Course, Mechanical Technology Inc., Latham, New York.
2. Wilcock, D.F. (ed.), 1972, "MTI Gas Bearing Design Manual", Mechanical Technology Inc., Latham, New York.
3. Gross, W.A., 1980, "Fluid Film Lubrication", John Wiley & Sons, New York.
4. Majumdar, B.C., 1972, "On the General Solution of Externally Pressurized Gas Journal Bearings", J. Lub. Tech., Trans. ASME, Vol. 94, No. 4, pp.291-296.
5. Elrod, H.G., and Glanfield, G.A. 1971, "Computer Procedures for the Design of Flexibly Mounted, Externally Pressurized, Gas Lubricated Journal Bearings",

- Proc. of 5th Gas Bearing Symposium, Univ. of Southampton, paper 22.
6. Kazimierski, Z., and Trojnariski, J., 1980, "Investigations of Externally Pressurized Gas Bearings With Different Feeding Systems", J. of Lub. Tech., Trans. ASME, Series F, Vol. 10, No. 4, pp.59-64.
  7. Castelli, V. and Pirvics, J., 1968, "Review of Numerical Methods in Gas Bearing Film Analysis", J. Lub. Tech., Trans. ASME, Vol. 90, No. 4, pp.777-792.
  8. 황 평, 박상신, 장인배, 한동철, 1989, "극소 공기막을 갖는 공기 베어링의 직접수치해법을 이용한 정적 해석", 대한기계학회 춘계학술대회.
  9. McCabe, J.T., et al., 1969, "Summary of Investigation of Entrance Effect of Circular Thrust Bearings", Proc. of 4th Biannual Gas Bearing Symposium, Univ. of Southampton, paper 17.
  10. Shapiro, A.H., 1953, "Compressible Fluid Flow", Vol. 1, Ronald Press Company, New York, N.Y.