

< 論 文 >

외압을 받는 공기윤활 저어널 베어링의 부하특성에 관한 연구

김 수 태* · 조 강 래**

(1987년 8월 6일 접수)

A Study on the Load Capacity Characteristics of the Externally Pressurized Air Lubricated Journal Bearings

Soo-Tae Kim and Kang-Rae Cho

Key Words : Externally Pressurized Air Bearing(외압 공기 베어링), Air Bearing(공기 베어링) Air Journal Bearing(공기 저어널 베어링), Circular Pocket(원형 포켓), Load Capacity(부하용량), Gas Bearing(가스 베어링)

Abstract

An investigation is carried out for the load capacity characteristics of the externally pressurized air lubricated journal bearings both theoretically and experimentally. Theoretical analysis is made using the incremental method and the finite element method, and the discharge coefficient is considered. The experiments are performed for five bearings which are produced according to the rows of supply holes and the presence of pocket or step. The results are compared with the numerical results. The present numerical results are in better agreement with the available experimental results than any other earlier numerical results for the bearings having one row and two rows of supply holes with pocket. The present numerical and experimental results show that the bearing with step has larger load capacity than that without step and that the load capacity increases as the clearance ratio increases.

기 호 설 명

A_e : 유한요소의 면적
 A_o : 공급구멍의 유효면적
 C : 반경방향의 틈새
 C_i, C_{ii} : 단이 있는 베어링의 틈새
 C_a : 유량계수
 D : 베어링 직경
 d_o : 공급구멍 직경
 d_r : 포켓의 직경

h : 무차원 막 두께
 h' : 막 두께
 h_i, h_{ii} : 단이 있는 베어링의 무차원 막 두께
 k : 간극비 (= C_{ii}/C_i)
 $[K]$: 전체 시스템 매트릭스
 K_{ij} : 요소 매트릭스
 L : 베어링 길이
 \dot{M}' : 질량유량
 \dot{M} : $\dot{M}'[12\mu R_o T / (p_a^2 C^3)]$
 \dot{M}_o' : 공급구멍의 질량유량
 \dot{m}_x, \dot{m}_x : 단위길이당 질량유량

* 연세대학교 대학원

** 정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

N, N_0	: 회전수
p'	: 압력
p	: p'/p_a
p_a	: 대기압
p_s'	: 공급압력
p_p'	: 공급구멍의 압력
$\{P\}$: 전체 해 벡터
R	: 베어링 반경
R_0	: 가스 상수
T	: 대기 온도
$\{V\}$: 전체 시스템 벡터
V_i	: 요소 벡터
W'	: 베어링 하중
W	: $W' / [(p_s' - p_a)LD]$
x	: 무차원 원주방향 좌표
x'	: 원주방향 좌표
z	: 무차원 축방향 좌표
z'	: 축방향 좌표
ϵ	: 편심률 (= e/C , = e/C_i)
β	: 설계 매개변수
Λ	: 압축성 매개변수
θ	: 최대틈새로부터의 원주방향 각도
μ	: 점성계수
γ	: 비열비

1. 서 론

우주, 항공 분야 및 원자로, 비디오, 고속용 드릴 등 초고속을 요하는 회전기기등 다방면에 걸쳐서 사용되고 있는 공기윤활 베어링은 고속회전, 동력 손실의 최소화, 베어링 온도상승의 억제 및 주변 오염방지에 있어서 이상적인 특징을 지니고 있어 사용범위가 더욱 확대되고 있는 반면에 부하용량이 작다는 단점이 있다. 따라서 공기베어링의 부하용량을 정확히 예측할 필요가 있으며 이를 위해 베어링 내부유동에 대한 해석이 필요하다.

Pinkus와 Etsion^(1,2)은 외압을 받지 않는 비압축성 및 압축성 윤활인 경우에 단이 있는 저어널 베어링과 무단 베어링의 부하를 비교 해석하여 단이 있는 베어링이 부하가 증대함을 보였고, Reddi와 Chu⁽³⁾는 Reynolds방정식을 푸는 데 증분법을 적용하여 비선형 식을 선형화시켜서 유한요소 해석에 적용할 수 있는 범함수를 구하였다. Allaire, Nicholas와 Gunter⁽⁴⁾는 유한한 베어링을 삼각형

요소로 분할하여 해를 구하는 데 발생하는 오차를 최소화시키는 요소 배치형태를 제시하고 유한요소법과 유한차분법으로 해를 구해 엄밀해와 비교하여 전자가 더욱 정확한 해를 얻음을 제시하였다. Grassam과 Powell⁽⁵⁾은 포켓이 있는 1열의 공급구멍을 가진 공기 윤활 베어링에 대해 압축성 매개변수와 편심률에 따른 부하용량을 실험으로 구하고 이 결과를 회전하지 않고 외압을 받는 경우에 외압을 받지 않고 회전에 따른 동압효과를 중첩시킨 결과와 비교하였으나 이론과 실험치에 차이가 크게 나타났다. Lund⁽⁶⁾는 포켓이 없는 2열의 단순 공급구멍을 가진 저어널 베어링에 line source를 가정하여 1차섭동법으로 부하용량 및 편심각 등을 구하였고, Cunningham, Fleming과 Anderson⁽⁷⁾은 2열의 포켓이 있는 공급구멍을 가진 저어널 베어링에 대하여 실험하여 이 결과를 Lund⁽⁶⁾의 이론 결과 및 선형화된 ph법으로 구한 결과와 비교하였다. 그 결과 낮은 편심률과 높은 공급 압력에서는 비교적 일치함을 보이나 그 이외의 조건에서는 차이가 크게 나타나고 있다. Majumda^(8,9)는 회전하지 않는 가스 저어널 베어링의 지배방정식인 Reynolds 방정식이 압력의 제곱항에 대해 선형화되므로 유량이 공급되는 절점의 유량을 중첩시키고 유량계수를 고려하여 부하용량 등을 구하고, 또한 압력에 대하여 섭동 이론을 적용하여 지배방정식을 선형화시켜 회전하는 경우의 이론해를 구하여 실험결과⁽⁷⁾와 비교하여 line source를 가정한 일차 섭동법보다 더욱 실험치에 일치함을 보였다. 그 계산결과는 공급 압력비가 낮은 경우에 대한 것이며 편심률이 커질수록 오차가 크게 나타났다. 또한 이와 같은 중첩법을 사용하여 Kayar, Salem, Khalil과 Hegazy⁽¹⁰⁾는 외압을 받는 기름윤활 베어링을 해석하였으며, Srinivasan과 Prabhu⁽¹¹⁾는 원추형 가스 베어링을 해석하였다. Pink와 Stout⁽¹²⁾는 공급 구멍이 2열인 가스 저어널 베어링에 대해 공급 압력비와 공급구멍의 크기에 따른 유량계수를 제시하고, 유한차분법으로 해석한 결과를 실험과 비교하여 높은 편심률에서도 잘 일치하고 있음을 보였으나 편심률 0.8 이상에서는 부하가 감소하는 모순된 결과를 보였다.

지금까지의 연구에서 공급구멍의 형태와 베어링 형상에 따른 부하용량에 대한 이론 및 실험에 대한 연구가 이루어졌으나 편심률이 큰 속에서는 오차가 크게 나타나고 있었고, 또한 단이 있는 저어널 베

어링에 있어서는 외압을 받지 않는 등압 베어링에 대해서 제시되었다. 회전하는 경우에 부하용량에 대한 이론 및 실험결과가 제시되어 있으나 편심률이 크고 압축성 매개변수가 커지면 오차가 커지고 있었다.

본 연구에서는 외압을 받는 공기윤활 저어널 베어링의 정적인 경우에 대해 증분법과 유한요소법을 적용하고 유량계수는 실험을 근거로 하여 포켓에서 베어링 내부로 유입될 때의 유압손실을 고려한 Pink와 Stout⁽¹²⁾의 값을 이용하였다. 수치계산된 결과는 유한차분법으로 계산된 결과⁽¹²⁾와 비교하여 편심률이 큰 경우까지 본 계산결과가 정확함을 검토하고, 회전하는 경우에도 1열 또는 2열의 포켓이 있는 공급구멍을 가진 저어널 베어링에 대한 이론 결과^(5,7,9) 및 실험결과^(6,7)와 비교하여 본 계산방법이 정확함을 입증하였다. 또한 단이 있는 베어링을 해석하여 단이 없는 무단베어링과 부하용량을 비교하여 부하증대 효과를 검토하고, 공급구멍의 열수와 포켓의 유무 및 단의 유무에 따른 정적인 상태에서의 부하용량에 대한 실험을 수행하고 계산결과와 비교하여 각각에 대한 부하용량 증대효과를 연구하였다.

2. 이 론

2.1 지배방정식

압축성 윤활의 경우에 저어널 베어링과 축 사이의 유동을 정상, 등은 및 층류 선회운동으로 보고 점성력에 비해 관성력을 작다고 무시하고, 유체를 이상기체라 하면 지배방정식인 Reynolds방정식과 베어링 내부를 흐르는 임의의 위치에서의 원주방향 및 축방향의 단위길이 당의 질량유량은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \Lambda \frac{\partial (\rho h)}{\partial x} \quad (1)$$

$$\Lambda = 12\pi \left(\frac{\mu N}{p_a} \right) \left(\frac{R}{C} \right)^2 \quad (2)$$

$$\dot{m}_x = p \left(\Lambda h - h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$\dot{m}_z = -\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

$$\text{단 } x = x'/R, \quad z = z'/R, \quad p = p'/p_a, \\ h = h'/C$$

비선형 지배방정식(1)을 유한요소 해석에 적용할 수 있도록 선형 방정식으로 바꾸기 위하여 증분법

을 적용하면 다음과 같다.

만약 회전수 $N = N_0$ 에 대하여 압력 p_0 가 알고 있는 값이라 하고 회전수 N 가 미소변화량 ΔN 만큼 변했을 때에 압축성 매개변수 Λ 의 변화량을 $\Delta \Lambda$ 라고 하고 압력도 Δp 만큼 변한다고 보면 식(2)로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta \Lambda = \Delta N \frac{\Lambda_0}{N_0}$$

$$\Lambda = \Lambda_0 + \Delta \Lambda \quad (5)$$

$$p = p_0 + \Delta p$$

이때 ΔN , $\Delta \Lambda$ 및 Δp 는 작은 양을 나타낸다.

식(5)를 식(1), (3), (4)에 대입하여 고차의 미소항을 무시하면 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[h^3 \frac{\partial (\rho p_0)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[h^3 \frac{\partial (\rho p_0)}{\partial z} \right] \\ = \frac{\partial}{\partial x} [h (\Lambda_0 p + \Lambda p_0)] \quad (6)$$

$$2\dot{m}_x = h (\Lambda_0 p + \Lambda p_0) - h^3 \frac{\partial (\rho p_0)}{\partial x} \quad (7)$$

$$2\dot{m}_z = -h^3 \frac{\partial (\rho p_0)}{\partial z} \quad (8)$$

지배방정식(6)에서 p_0 와 Λ_0 는 알고 있는 값이므로 유한요소법으로 해석할 수 있다.

여기서 h 는 막두께를 나타내며 단이 없는 경우는

$$h = 1 + \varepsilon \cos \theta \quad (9)$$

로 표시되며, 단이 있는 경우는 단의 위치를 경계로 막두께가 작은 영역을 I, 큰 영역을 II라고 하면 다음과 같다.

$$\text{영역 I : } h_I = 1 + \varepsilon \cos \theta \quad (10)$$

$$\text{영역 II : } h_{II} = k + \varepsilon \cos \theta$$

2.2 경계조건

(1) 경계조건

저어널 베어링의 경우에 베어링 틈새가 원주방향 길이에 비하여 대단히 작기 때문에 축방향으로 절단하여 Fig. 1과 같이 펼쳐서 해석할 수 있다. 경

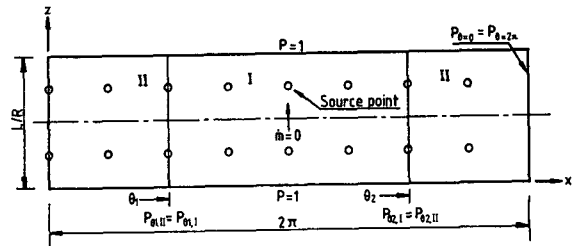


Fig. 1 Journal bearing split and boundary conditions

계조조건으로는 베어링 폭의 양단에서의 압력은 대기압과 같아야 하고 베어링 폭의 중심 절단면을 가로지르는 유량은 대칭성에 의하여 없어야 한다. 또한 직선절개 절단 양면에서의 압력은 서로 같아야 하므로 다음과 같이 주어진다.

$$p=1 \text{에서 } z=0, L/R \tag{11}$$

$$\dot{m}=0 \text{에서 } z=L/D \tag{12}$$

$$p(x=0)=p(x=2\pi) \tag{13}$$

단이 있는 베어링의 경우 단부부의 경계조건은 다음과 같다.

$$p(\theta_1, I)=p(\theta_1, II) \tag{14}$$

$$p(\theta_2, I)=p(\theta_2, II) \tag{15}$$

공급구멍 위치의 경계조건은 수치계산 초기치로써 임의의 압력을 가정하여 매 반복계산마다 수정해간다.

$$p(i, \text{source})=p(i, \text{assume}) \tag{16}$$

(i=1, 2, ..., n)

여기서 n은 1열당 공급구멍 수이다.

(2) 질량 유량

베어링 외부에서 공급구멍을 통하여 내부로 흘러 들어가는 질량유량과 베어링 내부에서 외부로 빠져 나가는 질량유량은 같아야 하며, Fig. 2에서 보듯이 공급구멍 주위에서 베어링 내부로 흐르는 질량 유량은 축방향의 유량 \dot{M}_x' 와 회전 주속도가 있는 원주방향의 유량 \dot{M}_z' 으로 나누어 제시된다.

$$\dot{M}_x' = \frac{p_a^2 C^3}{12\mu R_o T} \int_z p \left(\Lambda h - h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) dz \tag{17}$$

$$\dot{M}_z' = \frac{P_a^2 C^3}{12\mu R_o T} \int_x -ph^3 \frac{\partial p}{\partial z} dx \tag{18}$$

공급구멍 주위에서 베어링 내부로 흐르는 질량 유량 \dot{M}' 는 축방향과 원주방향의 유량의 합으로 표시된다.

$$\dot{M}' = \frac{p_a^2 C^3}{12\mu R_o T} \left\{ \int_{z=1/4}^{3/4} \left[p \left(\Lambda h - h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) \right]_{x=x_m-dx} \right.$$

$$\left. - p \left(\Lambda h - h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) \right|_{x=x_m+dx} \Big] dz + \int_{x_m-dx}^{x_m+dx} \left[-ph^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right]_{z=3/4} + ph^3 \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=1/4} \Big] dx \Big\} \tag{19}$$

공급구멍을 통과하는 유량은 공급구멍을 오리피스로 보고 단일 유동할 때의 유량과 같다고 하면 초우킹이 일어나기 전까지는, 즉

$$\frac{p_p'}{p_s'} > \left[\frac{2}{\gamma+1} \right]^{\gamma/(\gamma-1)}$$

일 때는 다음과 같이 주어지고

$$\dot{M}'_0 = C_a A_o P_s' \left[\frac{2\gamma}{R_o T (\gamma-1)} \right]^{1/2} \left[\left(\frac{p_p'}{p_s'} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{p_p'}{p_s'} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]^{1/2} \tag{20}$$

초우킹이 일어났을 경우, 즉

$$\frac{p_p'}{p_s'} \leq \left[\frac{2}{\gamma+1} \right]^{\gamma/(\gamma-1)}$$

일 때의 질량유량은 다음과 같다.

$$\dot{M}'_0 = C_a A_o P_s' \left(\frac{\gamma}{R_o T} \right)^{1/2} \left[\frac{2}{\gamma+1} \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \tag{21}$$

여기서 C_a 는 유량계수로써 Pink와 Stout⁽¹²⁾가 제시한 값을 인용한다.

외부에서 공급구멍을 통하여 베어링 내부로 공급되는 유량 \dot{M}'_0 과 공급구멍 주위에서 베어링 내부로 흐르는 유량 \dot{M}' 이 일치해야 하므로 초우킹이 일어나기 전은 식(19)와 식(20)으로부터 다음과 같다.

$$\beta \left[\left(\frac{p_p'}{p_s'} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{p_p'}{p_s'} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma-1} \right)^{1/2} - \dot{M} = 0 \tag{22}$$

여기서 β 는 다음과 같다.

$$\beta = \frac{12\mu C_a A_o P_s' (\gamma R_o T)^{1/2}}{p_a^2 C^3} \tag{23}$$

초우킹되는 경우는 식(19)과 식(21)으로부터

$$\beta \left[\frac{2}{\gamma+1} \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} - \dot{M} = 0 \tag{24}$$

의 식으로 주어진다.

2.3 수치계산

지배방정식 (6)에 변분원리를 이용하여 범함수를 구하고 유한요소를 적용하면 다음과 같은 행렬식으로 표시된다⁽¹³⁾.

$$[K]\{P\} = \{V\} \tag{25}$$

$$K_{ij} = \iint_{\Lambda_o} \left[\frac{p_o h^3}{4A_e} (b_i b_j + c_i c_j) + \frac{N_j h^3}{2A_e} (p_{o,x} b_i + p_{o,z} c_i) \right]$$

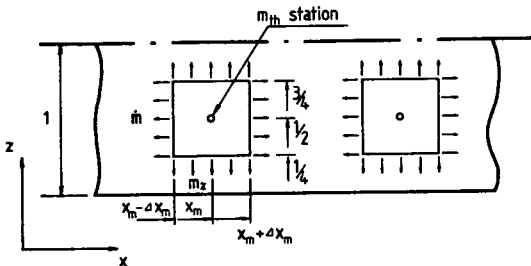


Fig. 2 Developed view of source points in journal bearing

$$-\frac{b_i}{2A_e} \Lambda_0 N_j h \Big] dA \quad (26)$$

$$V_i = \iint_{A_e} \frac{b_i}{2A_e} \Lambda p_0 h dA \quad (27)$$

이 식에서 첨자(*e*)는 임의의 유한요소를 의미하고 *A_e*는 요소의 면적을 나타내며 *N_i*는 내삽함수이다.

수치계산은 식(25)에 경계조건을 대입하여 회전하지 않는 경우, 즉 $\Lambda=0$ 일 때 공급구멍의 압력을 가정하여 압력분포를 계산하고 구한 압력을 가지고 Λ 를 점차 증가시키면서 계산한다. 이때 공급 질량 유량과 베어링 내부를 흐르는 질량유량이 같아야 하며 또한 초우킹이 나타나는 공급구멍의 압력도 공급유량과 베어링 내부로 흐르는 유량이 같도록 수정해 간다.

계산은 공급구멍을 통하여 공급되는 질량유량과 베어링 내부로 흐르는 질량유량의 차이와 공급구멍의 압력이 수렴될 때까지 반복 계산하고 해를 구하게 되며 계산 흐름도는 Fig. 3과 같다.

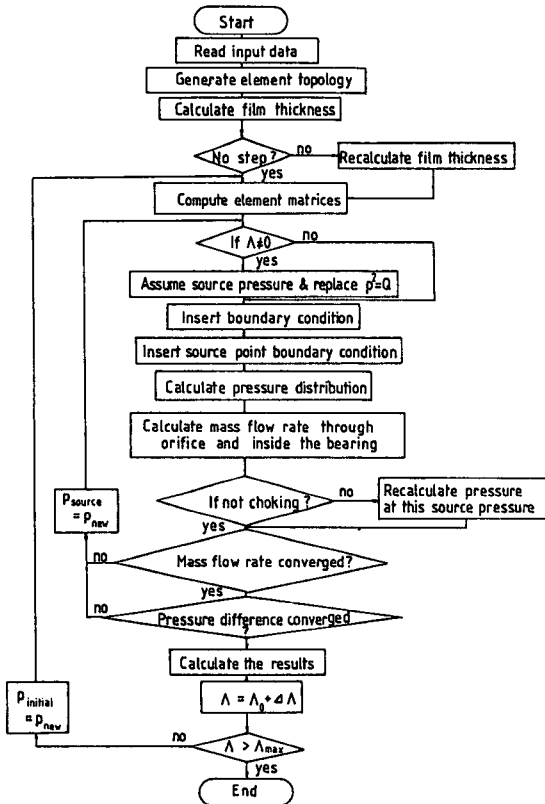


Fig. 3 Flow chart

3. 실험

본 연구에서의 수치계산 결과의 타당성을 논하기 위해 회전에 따른 부하변화에 대해서는 다른 연구자들의 실험결과^(6,7)와 비교하고, 정적인 상태에 대해서는 공급구멍의 포켓의 유무, 공급구멍의 열수 및 단의 유무에 따른 저어널 베어링의 부하용량 증대에 관한 실험을 하고, 수치계산 결과와 비교하였다.

실험은 회전을 하지 않는 정적인 상태에서의 부하용량과 편심률을 측정하였다. 시험 베어링의 종류는 포켓이 없는 1열, 포켓이 있는 1열과 2열 및 포켓이 있는 2열의 공급구멍을 가진 단이 있는 베어링 등이 있다. 각 베어링의 포켓의 직경은 4mm 이고 그 밖에 상세한 치수는 Table 1에 제시하였으며 Fig. 4에 공급구멍의 열수와 형상 및 베어링 내부의 형태에 따른 시험베어링을 도식적으로 나타내었다.

측과 베어링틈새의 변화에 따른 부하용량은 Fig. 5와 같이 추를 사용하여 하중을 증가시키면서 시험

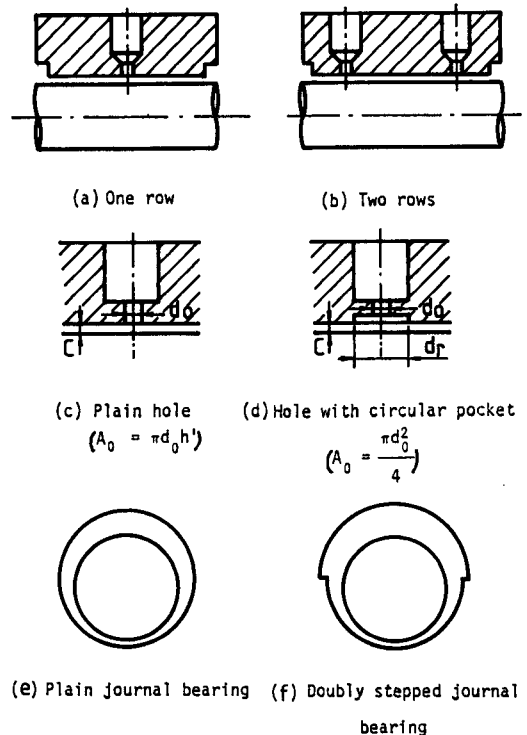


Fig. 4 Schematic diagram of row, pocket and step

Table 1 Specification of test bearings

Bearing No.	Bearing type	L/D (mm/mm)	Radial Clearance (μm)	Supply hole diameter	Supply hole per one row	Clearance ratio (C_{II}/C_I)
No. 1	no step plain hole one row	30/30	21	0.4	8	1
No. 2	no step circular-pocket one row	30/30	32	0.4	8	1
No. 3	no step circular-pocket two row	30/30	28	0.4	8	1
No. 4	step circular-pocket two rows	30/30	$C_I=35$ $C_{II}=41$	0.4	8	1.17
No. 5	step circular-pocket two rows	30/30	$C_I=26$ $C_{II}=33$	0.4	8	1.29

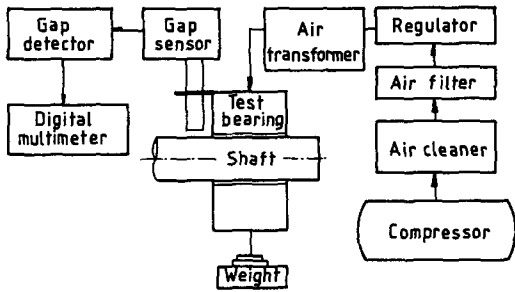


Fig. 5 Schematic diagram of experimental equipment

베어링에 부착된 갭 센서의 갭 디텍터 및 디지털 멀티미터를 사용하여 1 μm 범위까지 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서 수치계산에 사용된 컴퓨터는 IMB PC(AT)와 CDC 170-825이다. 이때 사용한 메시는 삼각형 요소를 구성하고 배치형태는 계산의 오차를 최소화시키는 형태(4)로 취하였으며, 해석에 사용

Table 2 Finite element and node number used in analysis

Supply hole number	Node number	Element number
12	125	192
16	165	256

된 절점의 수와 요소의 수는 압력공급 구멍수에 따라 Table 2와 같이 하여 해석하였다.

본 연구의 계산결과의 타당성을 보이기 위해 Fig. 6에 Pink와 Stout⁽¹²⁾가 유한차분법으로 해석한 결과와 비교하였다. 두 결과는 잘 일치하고 있으나 Pink들의 결과는 편심률 0.8이상에서 부하가 감소하는 데 이는 초우킹되는 공급구멍의 압력계산 처리의 차이에 기인하는 것으로 생각되며 실험결과를 볼 때 본 연구의 계산값이 타당한 것으로 생각된다. 공급구멍이 2열, 1열당 구멍수가 6개이며 공급구멍에 포켓이 있는 베어링에 대한 이론결과^(6,7,9)와 실험결과⁽⁷⁾를 Fig. 7에 제시하고 본 이론결과와

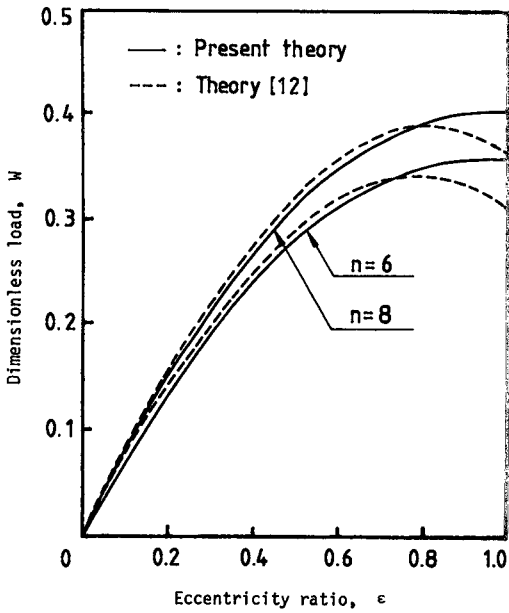


Fig. 6 Comparison of two theoretical load capacities of bearing with two rows of supply holes with pocket ($p_s=5.0$, $L/D=1.0$, number of supply hole per one row, $n=6, 8$)

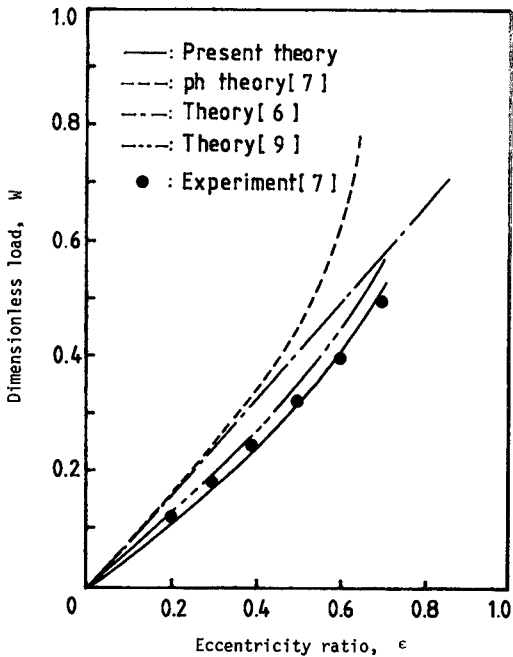


Fig. 7 Comparison of load capacities between four theories and experiments at $\Lambda=1.6$ (two rows of supply holes with pocket, $p_s=2.5$, $L/D=1.5$)

비교한 결과, 본 연구결과가 line source를 가정하여 해석한 결과⁽⁶⁾보다 실험치에 잘 일치하며, line source의 가정없이 해석한 Majumda⁽⁹⁾의 결과와 근사하고 또한 높은 편심률까지 다른 이론결과보다 실험결과⁽⁷⁾에 잘 일치하고 있으므로 회전하는 경우의 본 연구결과가 정확함을 확인할 수 있다. Fig. 8은 공급구멍이 1열이며 포켓이 있고 1열당 8개의 공급구멍을 가진 베어링에 대해 정지상태인 $\Lambda=0$ 에서 2.2까지 변화시키면서 얻은 계산결과와 실험결과⁽⁵⁾를 비교한 것으로 본 연구의 계산결과가 각 Λ 값에 따라 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 수치해석 결과가 공급구멍의 열수, 1열당 공급구멍수 및 공급압력의 변화에 대해서 실험결과와 잘 맞고 있으므로 본 연구 결과가 편심률과 Λ 의 증가에 따른 부하를 다른 이론 결과보다 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 베어링 No. 1, No. 2 그리고 No. 3의 편심률에 따른 무차원 부하용량에 대한 본 연구의 이론 및 실험결과를 나타낸다. 베어링 No. 1과 No. 2를 비교하면 공급구멍에 포켓을 줌으로써 틈새가 작은 고압영역에서 포켓 내부의 확대유동에 따른 압력상승 효과로 인해 부하가 증대함을 알 수 있고, 베어링 No. 2와 No. 3의 결과로부터 공급구

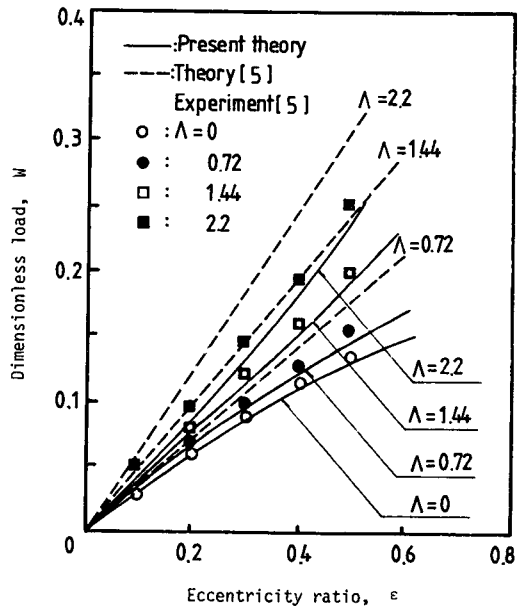


Fig. 8 Comparison of load capacities between theories and experiments for various compressibility parameter (one row of supply holes with pocket, $p_s=4.62$, $L/D=2.0$)

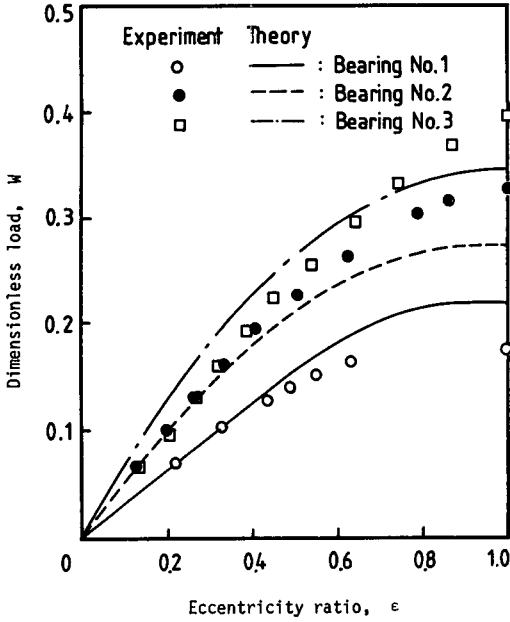


Fig. 9 Comparison of load capacities for bearing No. 1, No. 2 and No. 3 ($p_s=4.4$)

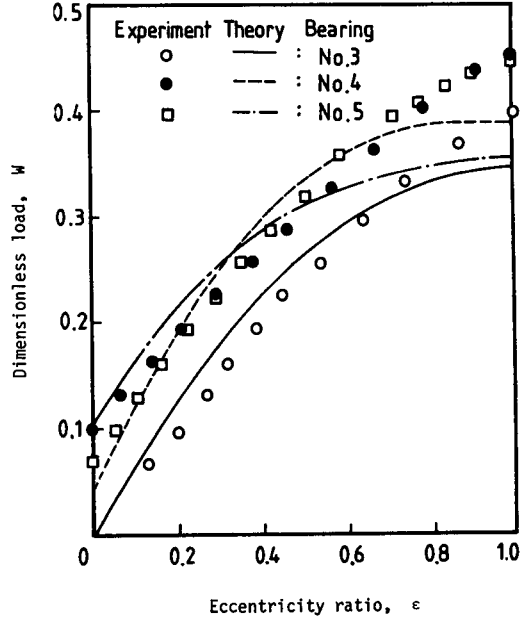


Fig. 11 Effects of stepped journal bearing (No. 4 and No. 5) at $p_s=4.4$

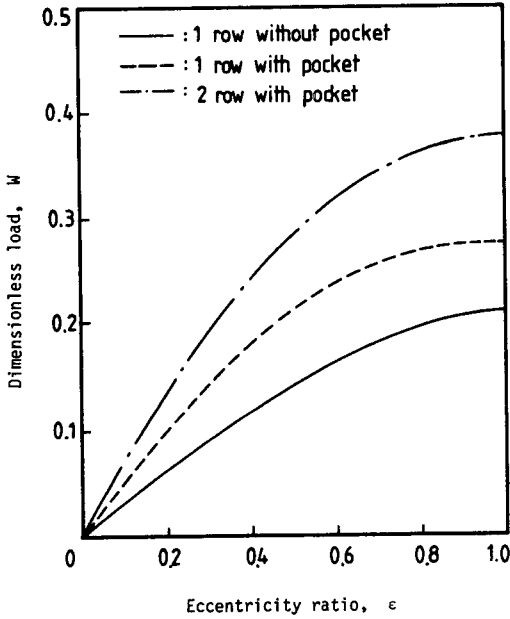


Fig. 10 Comparison of theoretical load capacities for the variation of shape of pressure supply hole ($C=32\mu m, p_s=4.4$)

멍을 1열에서 2열로 함으로써 부하는 증가하나 그 정도는 공급구멍의 열수에 비례하지 않음을 알 수 있으며, 또한 계산결과는 실험치에 대체로 잘 일치

하고 있음을 알 수 있다. 일정한 틈새를 갖는 경우에 포켓의 유무와 공급구멍의 열수의 효과를 보기 위해 베어링 No. 2의 치수를 기준으로 한 계산결과를 Fig. 10에 제시하였다. 여기서도 Fig. 9처럼 포켓 및 공급구멍의 열수의 효과를 계산결과에서 알 수 있다. Fig. 11은 공급구멍이 2열이고 베어링 틈새가 2단으로 되어있는 베어링이 단이 없는 평범한 베어링에 대해 부하중대 효과가 있는 지를 알아보기 위해 이들에 대한 이론 및 실험결과가 나타나 있다. 단이 있는 경우에 편심률이 0일 때 부하가 존재하는 것은 틈새가 작은 부분을 기준틈새로 잡았기 때문에 나타나는 현상이며, 단을 줌으로서 단 부분의 틈새가 커짐으로 인해 저압부의 압력이 강하하여 부하가 커지고 있으며 실험치에서의 증가량은 10~20%정도이다. Fig. 9와 Fig. 11에서의 이론과 실험결과의 차이는 지면 관계상 상세한 제시는 할 수 없지만 압력분포에 대한 이론 및 실험결과에도 나타나 있듯이 베어링 가공의 어려움으로 원통도, 진원도를 정확히 유지하지 못하고 있고, 단이 있는 베어링의 경우에 단의 가공이 정확하게 치수대로 제작되지 않은 점에 기인하는 것으로 생각된다. Fig. 12는 베어링 No. 5의 틈새가 작은 부분을 기준치수로 간극비를 1.15와 1.29로 변화시킨 결과로써, 간극비가 커짐에 따라 부하가 증가하고 있음

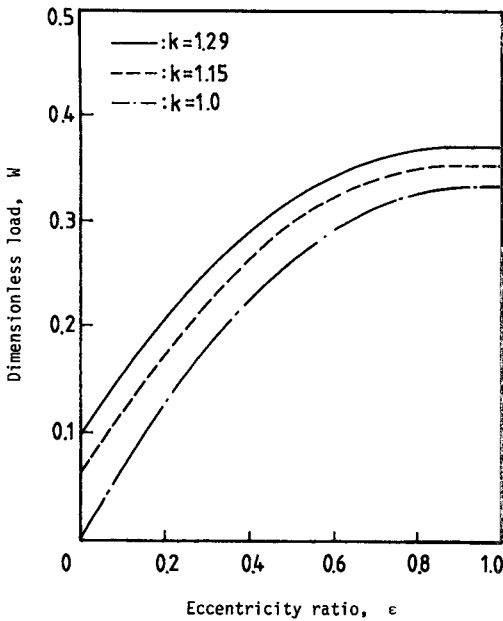


Fig. 12 Theoretical effects of stepped journal bearing for clearance ratio, $k=1.0, 1.15, 1.29$ ($C_f=26\mu\text{m}, p_s=5.85$)

을 알 수 있으며, 간극비가 커짐에 따라 저압부분의 압력강하 정도가 낮아져 부하증가가 감소하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

외압을 받는 공기윤활 저어널 베어링에 대해 압축성 매개변수와 편심률에 따른 부하용량 및 압력 분포를 수치계산하고 실험결과와 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 정지상태의 베어링에 대한 본 연구의 수치해석 결과는 유한 차분법으로 해석한 결과와 잘 일치하며, 높은 편심률에서 부하용량이 감소하는 모순이 개선되었다.
- (2) 회전하는 경우에 공급구멍에 포켓이 있고 열수가 1열과 2열인 베어링에 대한 계산결과는 과거의 어느 계산결과보다 실험치에 잘 일치하고 있다.
- (3) 공급구멍의 열수가 2열인 베어링이 1열보다 부하용량이 증대하고 포켓이 있는 공급구멍을 가진 베어링이 포켓이 없는 베어링보다 부하용량이 증대함이 확인되었으며, 단이 있는 베어링은 부하용량이 크게 나타나고 간극비가 클수록 부하용량이 증대하였다.

후 기

본 연구는 1986년도 문교부 학술연구조성비(한국 학술진흥재단 연구비)에 의해 이루어진 것으로 동 재단에 감사의 뜻을 표하는 바입니다.

참 고 문 헌

- (1) Pinkus, O. and Etsion, I., 1973, "Analysis of Stepped Finite Journal Bearings", *Isr. J. Tech.* Vol. 11, pp. 195~204.
- (2) Pinkus, O. and Etsion, I., 1974, "Analysis of Doubly-Stepped Gas Journal Bearings", *Isr. J. Tech.* Vol. 12, pp. 169~176.
- (3) Reddi, M.M. and Chu, T.Y., 1970, "Finite Element Solution of the Steady State Compressible Lubrication Problem", *Journal of the Lubrication Technology*, Trans. ASME, pp. 295~503.
- (4) Allaire, P.E., Nicholas, J.C. and Gunter, E.J., 1977, "Systems of Finite Elements for Finite Bearings", *Journal of Lubrication Technology*, Trans. ASME, pp. 187~197.
- (5) Grassam, N.S. and Powell, J.W., 1964, "Gas Lubricated Bearings", London, Butterworths, pp. 163~172.
- (6) Lund, J.W., 1964, "The Hydrostatic Gas Journal Bearing with Journal Rotation and Vibration", *Journal of Basic Engineering*, Trans. ASME, Vol. 86, No. 2, pp. 328~339.
- (7) Cunningham, R.E., Fleming, D.P. and Anderson, W.J., 1969, "Experiments on Rotating Externally Pressurized Air Journal Bearings, I-Load Capacity and Stiffness", NASA Tech. Note, NASA TN D-5191.
- (8) Majumda, B.C., 1972, "On the General Solution of Externally Pressurized Gas Journal Bearings", *Journal of Lubrication Technology*, Trans. ASME, pp. 291~296.
- (9) Majumda, B.C., 1973, "Analysis of Externally Pressurized Gas Bearings with Journal Rotation", *Wear*, Vol. 24, pp. 15~22.
- (10) Kayar, A.E., Salem, E.A., Khail, F.F. and Hegazy, A.A., 1983 "Two Dimensional Finite Difference Solution for Externally Pressurized Journal Bearings of Finite Length", *Wear*, Vol. 84, pp. 1~13.
- (11) Srinivasan, K. and Prabhu, B.S., 1983, "Analysis of Externally Pressurized Gas Lubricated Conical Bearing", *Wear*, Vol. 86, pp. 201~212.

- (12) Stout, K.J. and Pink, E.G., 1979, "Orifice Restrictor Losses in Journal Bearings", Proc. Instrn. Mech. Engrs. Vol. 193, pp. 47~52.
- (13) Chung, T.J., 1978, "Finite Element Analysis in Fluid Dynamics", New York, McGraw-Hill.