

2열 외부가압 공기 저어널 베어링에서 공기 급기구 위치에 따른 동적계수에 관한 실험적 연구

이종렬, 이준석, 성승학*, 이득우*

부산대학교 대학원
*부산대학교 기계공학부

A Experimental Study on the Dynamic Coefficients according to the Source Positions in Externally Pressurised Air-lubricated Journal Bearing with Two Row Sources

Jong-Ryul Lee, Jun-seok Lee, Sueng-Hak Soeng*, Deug-Woo Lee*

Graduate School, Pusan national university

*Department of Mechanical Engineering, Pusan National University

Abstract

This paper has been presented the dynamic effect by the journal speed, eccentricity and source positions in order to overcome the defects of air bearing such as low stiffness and damping coefficient. Choosing the two row source position of air bearing is different from previous investigations in the side of pressure distribution of air film by the wedge effects. These optimal chooses of the two row source positions enable us to improve the performance of the film reaction force and loading force as making the high speed spindle. The results of investigated characteristics may be applied to precision devices like ultra-precision grinding machine and ultra high speed milling.

Key words - two row source positions, wedge effects, film reaction force, loading force

1. 서론

공기베어링은 공기를 윤활제로 쓰므로 마찰이 적어 고속 기계에 적합하고, 평균화 효과에 의해 매끄럽게 회전하므로 회전 정밀도가 높아 초정밀 공작 기계와 고정밀 측정기에 적합하다.

그러나 공기 베어링은 점성이 작아 부하 능력이 기름 베어링에 비해 떨어지고 비상 사태 시 경계운활을 기대할 수 없는 단점이 있다. 공기 베어링의 여러가지 장점에도 불구하고 낮은 부하 능력과 강성 때문에 이를 개선하기 위한 많은 노력이 있어 왔다. 이러한 연구들을 크게 나누어 보면 부하 변동에 따라 간극을 조절하는 것과 공기베어링의 공기막 두께를 직접 제어하는 등 스퀴즈 효과를 이용하는 것, 그리고 베어링의 기하학적 형상을 바꾸어 보는 것이 있다. 1984년 Singh[1]은 공기 베어링의 안정한계속도, 동적계수 등에 대하여 이론적으로 연구 하였으며, 1989년 한[2]과 반[3]은 저어널의 편심율과 회전속도가 증가할수록 베어링의 강성이 증가함을 실험을 통하여 규명하였다. 1992년 Kazimiersk[4]는 탄성체링을 이용 2중 부시 공기베어링을 사용함으로써 고강성화 베어링에 대한 연구를 수행하였다. 1994년 Yoshimoto[5]는 가변 원판을 이용하여 부하 변동에 따라 레스트릭터의 간극이 스스로 조절 되는 스템스트 공기베어링을 제안하여 높은 강성을 얻었다.

본 연구에서는 고속스핀들에 적용이 되고있는 2열 급기공 공기베어링에서 편심량이 증가함에 따라 베어링의 압력이 증가하는 이론을 기초로하여 기체 공급구의 압력 경계조건을 선공급원으로 가정하여 Fig.1과 같은 고강성화 설계 변수 중의 하나인 급기구의 위치의 변화에 따른 베어링의 압력분포를 계산함과 동시에 실험을 통한 최적 공기 유막의 동적계수의 최적 경계조건을 찾고자 한다.

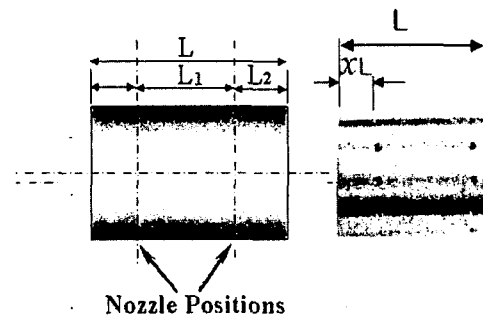


Fig.1 Design parameters for the bearing length

2. 공기 저어널 베어링 해석

2.1 레이놀즈 방정식

공기베어링의 윤활막의 압력분포를 계산하기 위해서 Fig.2 와같은 베어링 좌표계에서 공기의 유동을 나타내는 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 연립하여 공기 베어링에 대한 레이놀즈 방정식을 유도한다.

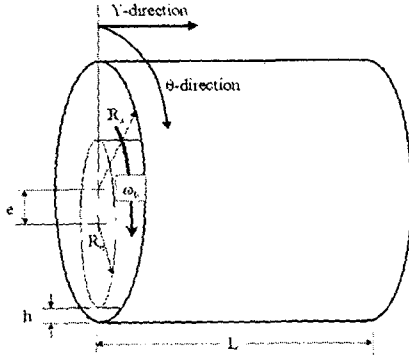


Fig. 2 Bearing coordinates system

이때 다음과 같은 가정을 하게 된다.

- (1) 유막이 면적에 비해 매우 얇아서 유막두께의 속도 구배를 제외한 다른 방향의 속도구배는 무시할 수 있다.
- (2) 입자의 형상부분의 곡률은 무시하고 평면으로 가정하였다.
- (3) 유체관성력의 영향은 점성력에 비해 매우 작아서 무시한다.
: 관성력의 영향은 Reynold Number가 증가할수록, 간극비가 클수록 성능에 큰 영향을 줄것으로 예측이 된다. 본 연구에서 간극비(h/L)가 상당히 작으므로 층류로 가정이 가능하다. 따라서 관성력의 무시가 가능하다.
- (4) 베어링에 작용하는 외력은 중력밖에 존재하지 않으므로 체적력은 매우 작다고 볼 수 있다.
- (5) 매우 좁은 간극하에서 유동이 일어나기 때문에 유막두께 방향의 압력은 변하지 않는다.
- (6) 유체는 No-Slip상의 층류유동이라 가정한다.
- (7) 윤활제로 사용되는 공기는 이상기체상태방정식을 만족한다.

위와 같은 가정하에서 Navier-Stokes 방정식을 간결히 한 후 이에 적당한 속도경계조건을 적용하여 속도분포를 구하고 이를 베어링 틈새방향에 대하여 적분한 형식의 연속방정식에 대입하여 정리하면 다음과 같은 레이놀즈 방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Ph^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Ph^3 \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 6\eta \cdot U_j \cdot \frac{\partial (Ph)}{\partial x} \quad (1)$$

여기서,

$$\bar{P} = \frac{P}{P_a}, \quad \bar{U} = \frac{U_j}{R\omega}, \quad \bar{h} = \frac{h}{C}, \quad \theta = \frac{x}{R}$$

$$\zeta = \frac{y}{R}, \quad \Lambda = \frac{6\eta\omega}{P_a} \left(\frac{D}{C} \right)^2, \quad h = C(1 - e \cos \theta) \quad (2)$$

이러두고 무차원화 하면 다음의 무차원화 된 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \bar{P} \bar{h}^3 \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left\{ \bar{P} \bar{h}^3 \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \zeta} \right) \right\} = \Lambda \left(\frac{\partial \bar{P} \bar{h}}{\partial \theta} \right) \quad (3)$$

2.2 경계조건

경계조건 베어링의 양 끝단은 대기압의 조건을 가정하고, 기체 공급구에서는 공급 압력비를 5로 가정하여 다음과 같은 주기조건으로 가정하였다.

$$\bar{P} = 1, \text{ at } \zeta = \pm L/D$$

$$\bar{P} = 5, \text{ at } \zeta = \pm L_2/D$$

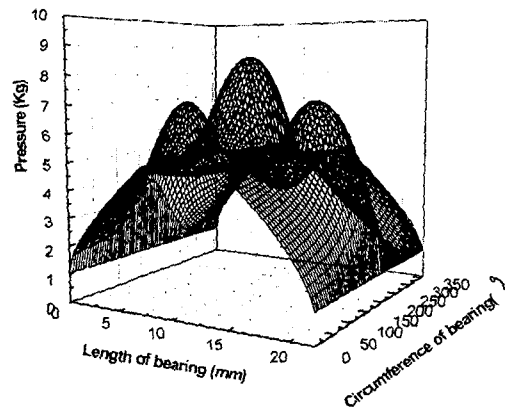
$$\left(L_2 = \frac{L}{3}, \frac{L}{4}, \frac{L}{5}, \frac{L}{7}, \frac{L}{11} \right) \quad (16)$$

$$\bar{P}(\theta, \zeta) = \bar{P}(\theta \pm 2\pi, \zeta)$$

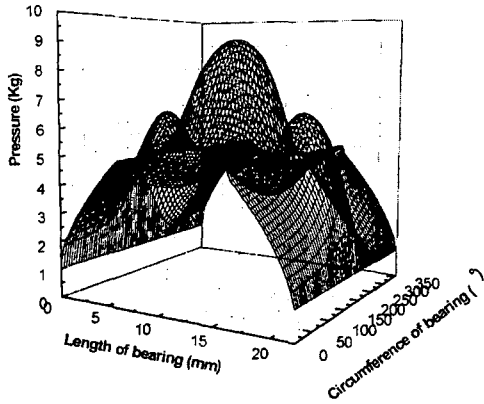
본 계산에 있어서 회전방향으로의 등분은 등간격으로 71등분, 축방향으로 등간격으로 66등분을 하여 계산을 수행하였다.

3. 해석 결과

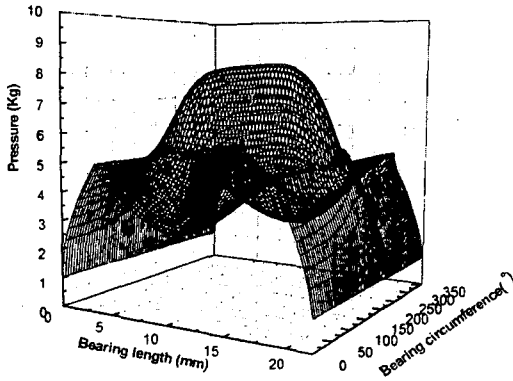
3.1 공기급기구 위치에 따른 유막압력



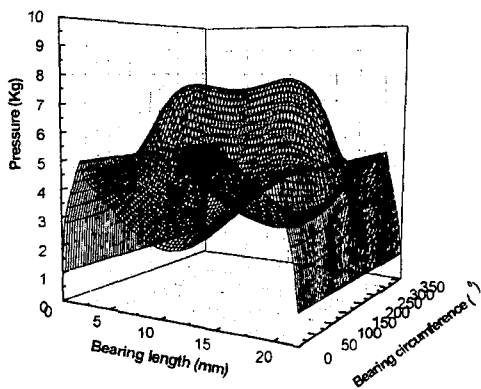
(a) Source position = 1/3 L



(b) Source position = 1/4 L



(c) Source position = 1/7 L



(d) Source position = 1/11 L

Fig.3 Pressure distributions in air-lubricated journal bearing according to the air source positions

스핀들용 공기베어링은 피삭재를 가공하는 동안 절삭 저항에 의한 동적하중을 받게 되기 때문에 축 중심이 변함으로써 편심량은 절삭력에 따라 비례적으로 증가하게 되고 최대 편심량의 한계치는 부하 지지능력을 결정하는 요소가 된다고 할 수 있다. Fig.3은 DmK 2,000,000 편심율 0.6에서의 공기 공급구의 위치에 따른 압력분포를 나타내었다. Fig.3에서 보는 바와같이 베어링 내의 유막의 압력분포는 정적압력의 분포보다는 동적인 압력의 영향을 지배적으로 받고 있음을 알 수 있다. 결국 저어닐의 고속회전과 동시 피삭재 절삭에 참여하고 있을 때 동적인 압력에 의한 부하능력이 정적인 압력에 의한 부하능력 보다 지배적으로 영향을 미칠 수 있음을 쉽게 예측할 수 있다. 그리고 공기 공급구의 위치에 따라 동적인 압력에 의한 분포형태가 달라지며 이러한 동압 분포 형태의 변화는 전체 베어링 부하 능력에 변화를 줄 수 있으므로 보여주고 있다.

본 연구에서는 이러한 압력의 영향에 의한 공기 유평막의 동적계수를 파악하기 위하여 다음과 같은 실험을 통하여 최적 공기공급구 위치 경계를 선정하고자 한다.

4. 실험

4-1 실험내용

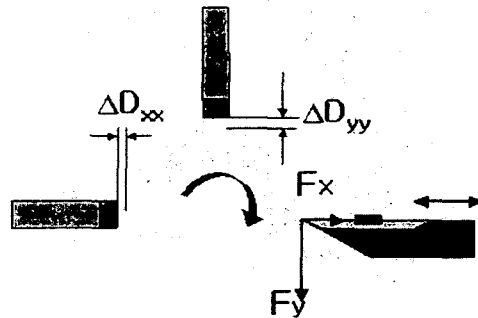


Fig.4 Experimental model

실험적 내용은 Fig.4와 같이 2차원 절삭을 이용하여 Direct방향의 절삭력과 용량형 정밀 변위신호를 이용하여 실용적이고 신뢰할 수 있는 베어링의 동적계수를 획득할 수 있으리라 사료되어 진다. 이러한 실험장치 구성은 동적계수에 관하여 연구한 많은 연구내용들의 단점은 보완할 수 있다. 많은 연구원들은 동적계수를 찾기 위하여 불평형 질량을 부착하여 동적특성을 가진 후 그때의 변위신호를 획득하여 부착한 불평형 질량을 회전속도와 계산을 통하여 힘을 계산한 다음 변위신호를 통한 동적계수를 계산하였다. 이러한 방법은 회전시 발생하는 휠(Whirl)의 신호에 따른 정확한 불평형 질량의 위치와 변위치를 찾아내기에는 어려움이 많다고 할 수 있다.

그러나 Fig.4와 같은 방법은 우선 절삭공구를 통하여 회전 저어닐이 고정되어 회전함으로써 절삭력에 따른 정확한 변위량을 찾을 수 있으며, 절삭시 발생하는 주

분력과 배분력간의 절삭력을 정확히 획득함으로써 Direction방향의 정확한 동적계수를 측정 할 수 있는 장점이 있다.

4-2 실험 장치 구성

본 연구에서 사용된 실험장치는 2차원 절삭가공의 모형인 절단 가공형으로 구성되어 있다. 이 실험장치에는 두 개의 레이디얼 베어링사이 에 절단 바이트를 이용하여 절삭을 행함으로써 베어링의 절삭 부하지지능력을 비교할 수 있도록 제작이 되었으며, 고압의 공기로 블레이드를 고속으로 회전시키도록 되어 있다. 레이디얼 베어링은 급기공의 위치가 다른 3가지를 준비하여 각각에 대해 실험을 하였다. AC 서보 모터가 일정한 속도로 절단 바이트를 이송시키면서 절삭을 행하고 절단 바이트와 같이 고정된 공구동력계에 의해서 2방향의 힘이 측정되도록 구성되어 있다. 축에는 변위 센서를 설치하여 Direction 방향의 변형을 측정할 수 있게 하였다. 그림 5 실험장치를 나타낸다.

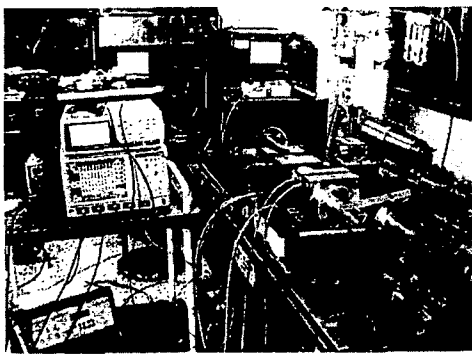
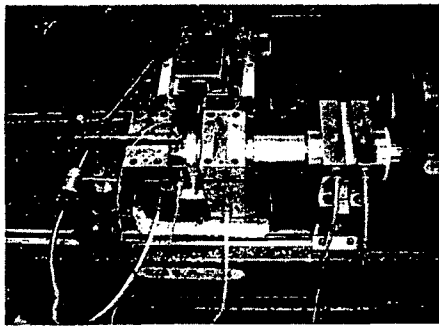


Fig.5 Experimental set-up

본 실험에서 사용한 변위 측정 센서는 분해능 5nm인 용량형 변위계를 이용하였으며, 공구동력계는 Kistler사에서 제작한 9257B를 이용하였다. 변위 측정 센서와 공구동력계에서 나온 신호들은 증폭이 되어 LeCroy사의 4채널 디지털 오실로스코프에 2방향의

변위신호와 2방향의 절삭력이 입력이 되어 저장되도록 하였다. 본 연구의 실험장치는 AC 서보 모터를 10mm/min으로 이송하게 하여 절단 바이트가 공작물에 천천히 절입이 되도록 하였다.

회전 축의 속도가 정상상태에 도달한 뒤 실험을 할 수 있게 하기 위해 회전 개시 후 10분간 공회전을 한 후에 스피들의 회전속도가 20,000rpm에 도달하였을 때 실험을 시작하였다. 이와 같은 실험은 각각의 베어링에 대해서 반복하였다. 각 센서들로부터 오는 신호는 오실로스코프에 입력하여 임시로 저장되도록 한 후에 RS232를 통해 컴퓨터로 전송되도록 하였다.

이러한 실험장치는 일반적인 베어링의 동강성을 측정하기 위하여 불평형 질량을 부착함으로써 발생하는 회전오차를 발생시킴으로써 측정하는 기법과는 달리 절삭가공을 행함으로써 2방향의 절삭력을 동시에 획득이 가능하고, 절단 공구가 회전스피들을 고정시킴으로써 회전시 발생하는 변위오차량을 최소화 시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 실험방법을 통하여 신뢰할 수 있는, 그리고 현장에 직접 적용이 가능한 베어링의 동강성을 측정할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 실험결과 및 고찰

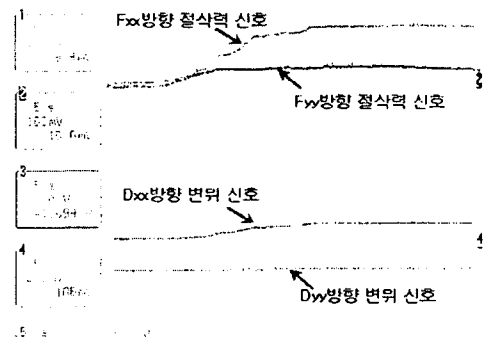


Fig.6 The cutting force and gap signals

본 실험에서는 공구 동력계를 이용하여 피삭재 회전방향의 절삭력과 절입방향의 절삭력을 획득하였으며 절삭시 절삭력에 의해 발생하는 축의 미소 변형을 변위 센서를 이용하여 변위량의 신호를 분석하였다.

Fig.6 은 공구 동력계와 변위 센서로 통하여 측정된 실험 신호를 나타내고 있다. 실험 결과에 의하면 같은 변위량에도 불구하고 1/7L에서의 절삭력이 가장 크게 획득할 수 있었다. 결국 통상 공기 정압 베어링의 설계시 변수로서 급기구의 위치 설계시 1/4L의 위치 선정은 순수 정적인 압력만 존재하였을 경우 적용이 가능하였으나, 스피들의 회전속도가 높을수록 편심의 변화가 발생할 수 록 급기구의 위치의 선정에 있어서 동적인 영향, 즉 쇄기효과에 의한 압력변화가 있음을 고려하여 급기구 위치 선정이 다시 고려 되어져야 함을 보여주고 있다.

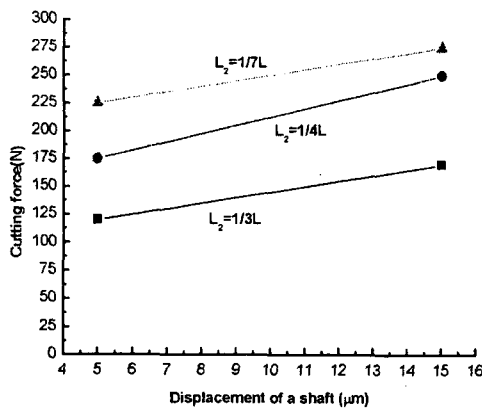


Fig.7 The characteristics between loading capacity and loading displacements

5. 결론

저어널의 회전속도, 베어링 간극의 크기, 편심량의 크기에 따라 베어링의 특성에 관한 선행 연구에 뒤이어 외부 가압형 2열 급기 공기 베어링의 위치에 따른 베어링 유막력의 특성을 평가하고 실험을 함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 2열 급기 노즐 베어링 설계시 노즐의 위치 선정이 베어링의 강성화 및 회전 안정성에 영향이 있음을 입증 할 수 있었다.
- 하이 브리드 2열 급기 공기 베어링의 이론적 분석에서 베어링의 직경과 베어링의 길이의 비가 1일 때 베어링의 노즐 위치는 베어링끝단에서 베어링 전체길이의 1/7위에 선정하는 것이 유리함을 보여주었다.
- 실험에서도 이론에서의 결과와 마찬가지로 베어링의 직경과 베어링의 길이의 비가 1일 때 베어링의 노즐 위치는 베어링끝단에서 베어링 전체길이의 1/7위에 선정하는 것이 강성이 높게 나옴을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- D.V.Singh, R.Sinhasan and S.S.Wadhwa, "Dynamic performance of plain gas journal bearing, " Tribology international, 1984, Vol.15 pp33-41
- 한 상 옥, 석사학위논문, "외부가압 공기저어널 베어링의 동적계수에 관한 실험적연구", 한국과학기술원.1989
- 반 중 역, 석사학위논문 " 외부가압기체의 국부조절에 의한 기체베어링의 안정성 향상에 관한 연구", 한국과학기술원, 1989
- Z.Kazimierski, L.Brzeski T.Lech "Experimental

investigations of precision spinles equipped with high stiffness gas journal bearings" Precision Engineering 23, 1999,pp.155-163

5. S.Yoshimoto, Y. Anno, Y.Hirakawa, "Aerostatic thrust bearing with a self controlled restrictor employing a floating disk", JSME Int. Vol.37, No 2,1994, pp.369-375.

6. G.H.Jang, Y.J.Kim, "Calculation of Dynamic Coefficients in a Hydrodynamic Bearing Considering Five Degrees of Freedom for a General Rotor-Bearing System", ASME Journal of Tribology ,JULY 1999, Vol.121, pp.499-505

7. Klit.p. Lund.J.W. " Calculation of Dynamic Coefficient of Journal Bearing Using a Variational Approach", ASME Journal of Tribology, ASME Journal of Tribology, 1986, VOL 108,pp.421-425

기 호 설 명

\bar{P} : 무차원 압력($\frac{P_s}{P_a}$)

P_s : 베어링 공급 압력

P_a : 대기압력

U_j : 저어널의 운전속도

R : 저어널의 반경

ω : 저어널의 각속도

h : 베어링의 틈새

\bar{h} : 무차원 베어링과 저어널 간극변화

e : 편심률

C : 베어링의 평균틈새

η : 공기의 점성계수

θ : 베어링의 원주방향의 좌표계

ζ : 베어링의 길이방향의 좌표계

Λ : 베어링 수 $\Lambda = \frac{6\eta\omega}{P_a} \left(\frac{D}{C} \right)^2$

D : 베어링의 직경

L : 베어링의 길이

L_2 : 베어링 공기 공급구 위치

W_x : 베어링 원주방향의 유막력

W_y : 베어링 길이방향의 유막력

W : 베어링 전체 부하지지력