

공기 정압 저어널 베어링에서 동강성 측정에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Dynamic Stiffness Measurement of Air Journal Bearing

이종렬, 이준석(부산대학교 대학원), 이득우(부산대학교 기계공학부),
김태형, 박보선((주)대우중합기계)

Jong-Ryul Lee, Jun-Seok Lee(Pusan Nat'l Univ., Graduate School),
Deug-Woo Lee(Pusan Nat'l Univ. Department of Mechanical Engineering),
Tae-Hyung Kim, Bo-Sun Park(Daewoo Heavy Industry Co.)

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 two row sources position of air bearing is different from previous investigations in the side of pressure distribution of air film by the wedge effects. An experimental study was performed to compare theoretical analysis. The dynamic stiffness was measured in actual cutting. It helps predicting of air spindle's characteristic in machining of die more precisely. The results of investigated characteristics was applied to air spindle for high speed milling.

Key Word : Air Bearing, Dynamic Stiffness,

1. 서론

공기 정압 스피들에 있어서 공기베어링은 점성이 기름에 비해 매우 작은 공기를 윤활제로 사용하기 때문에 마찰이 적고 고속 회전이 가능하다. 공기의 압축성은 축과 베어링의 표면 요철이나 형상 오차 등을 어느 정도 흡수하는 역할을 하여 운전 정밀도가 우수하다. 이러한 이유로 공기 베어링은 마찰과 회전에 따른 열 발생이 거의 없고 회전 정밀도가 뛰어나기 때문에 고속 회전

체나 높은 정밀도를 요구하는 시스템에 많이 사용된다.

그러나 공기 베어링은 점성이 작아 부하 능력이 기름 베어링에 비해 떨어지고 비상 사태시 경계 윤활을 기대할 수 없는 단점이 있다. 또한, 외부가압 공기 저널 베어링의 회전수에 따른 불균형 질량에 의한 진동 진폭은 공진점까지 진폭이 점차적으로 증가하고 그 후에는 점차 감소하다가 운전 조건에 따라 공진 속도의 두 배 이상의 임의의 속도에서 진폭이 급격하게 증가한다. 이 불안정성을 whirl 불안정성이라 하며, 이것은 발생 속도 이상으로 속도를 높이는 것을 어렵게 한다.

이러한 회전 안정조건을 찾기 위해 Lason [2]은 Whirl ratio와 공급압력간의 관계에 대해 연구하였으며, Pan[3]은 베어링 길이 비에 따른 불안정 개시 속도를 이론적으로 규명하였다.

Taniguchi[4]는 외부가압 공기 저널 베어링에 관한 실험적 연구에서 급기 구멍의 개수와 급기 압력, 케어링 틈새를 매개변수로 하여 이것들과 불안정현상과 관계에 대하여 연구하였다. 이와 같이 베어링의 형상에 따라 회전안정성에 관한 연구는 지속적으로 연구되고 있다. 그러나 현재까지 공기베어링을 금형가공기를 목적으로 한 고강성 공기베어링 설계에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 산업 현장에서 사용할 수 있는 고정밀 고강성 공기스핀들 개발을 위해 2열 노즐

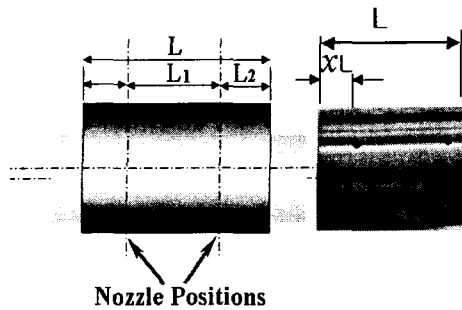


그림 1. 베어링길이에 따른 설계변수

배열 공기정압 베어링에서 급기공간의 거리, 그리고 급기공의 형상에 따라, 즉 강성을 발생시키기 위해 사용되는 유체 저항기의 종류에 따른 베어링 강성에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 이론적으로 구한 베어링 강성을 실험을 통해 검증하였다. 실험에서는 기존의 베어링 동강성 측정하는 방식과는 달리 실제로 절삭을 행하면서 강성을 측정하여 실제 가공에 대응되도록 하였다. 이 연구로부터 2열 노즐 배열 공기정압 베어링에 관한 고강성화 최적 설계조건을 찾아내고 스피들 샤프트의 회전 안정성해석을 수행함으로써 현재 개발하고 있는 급형가공용 공기 주축 설계에 도움이 되도록 하였다.

2. 공기 베어링 해석

2.1 이론 수치 해석

공기베어링의 윤활막의 압력분포를 계산하기 위해서 그림 2와 같은 베어링 좌표계에서 공기의 유동을 나타내는 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 연립하여 공기베어링에 대한 Reynolds 방정식을 유도한다. 이때 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 유막이 면적에 비해 매우 얇아서 유막두께의 속도구배를 제외한 다른 방향의 속도구배는 무시할 수 있다.
- (2) 임의의 형상부분의 곡률은 무시하고 평면으로 가정하였다.
- (3) 유체관성력의 영향은 점성력에 비해 매우 작아서 무시한다.

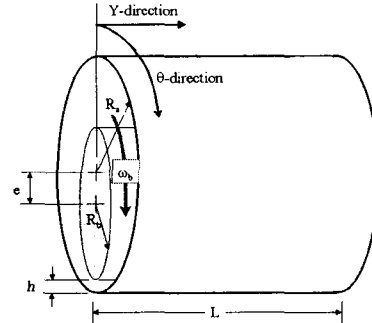


그림 2. 베어링 좌표계

- (4) 베어링에 작용하는 외력은 중력밖에 존재하지 않으므로 체적력은 매우 작다고 볼 수 있다.
- (5) 매우 좁은 간극 하에서 유동이 일어나기 때문에 유막두께 방향의 압력은 변하지 않는다.
- (6) 유체는 미끄럼이 없는 층류유동이라고 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 Reynolds 방정식을 구할 수 있다.

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

R : 베어링의 반경 δ : 베어링 원주방향의 좌표

ζ : 베어링 길이방향의 좌표 r : 저어널 반경

ω : 저어널 원주방향의 속도 P_a : 대기 압력

C : 공기베어링 간극 Λ : 베어링 수

여기서,

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

$$\zeta = \frac{y}{R}, \quad \tau = \omega t, \quad \Lambda = \frac{6\eta\omega}{P_a} \left(\frac{D}{C} \right)^2$$

로 하여 무차원화하면 (1)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial \delta} \left\{ \bar{P} \bar{h}^3 \left(\frac{\partial P}{\partial \delta} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left\{ \bar{P} \bar{h}^3 \left(\frac{\partial P}{\partial \zeta} \right) \right\} = \Lambda \left(\frac{\partial \bar{P} \bar{h}}{\partial \delta} \right) \quad (2)$$

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

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

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

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

$$P(\delta, \zeta) = P(\delta \pm 2\pi, \zeta)$$

2.2 베어링 부하지지능력

스핀들용 공기베어링은 피삭재를 가공하는 동안 절삭저항에 의한 동적하중을 받게 되기 때문에 축 중심이 변함으로써 발생하는 편심량은 절삭력에 따라 비례적으로 증가하게 되고 최대 편심량의 한계치는 부하 지지능력을 결정하는 요소가 된다고 할 수 있다.

고속 스핀들용 공기 정압 베어링의 부하지지능력은 각 노드에서 계산된 압력값으로부터 계산을 할 수 있다. 계산식은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$W_x = \frac{F_{px}}{P_a LD} = - \int_0^L \int_0^{2\pi} P \cos \theta R dx dy \quad (3)$$

$$W_y = \frac{F_{py}}{P_a LD} = \int_0^L \int_0^{2\pi} P \sin \theta R dx dy \quad (4)$$

F_{px} : hybrid pressure force of x axis

F_{py} : hybrid pressure force of y axis

전체 부하지지능력은 다음과 같이 표현이 된다.

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (5)$$

2.3 해석결과

그림. 3, 그림. 4, 그림. 5에서 보는 바와 같이 초기 편심율이 적은 경우 정압에 의한 전형적인 정압 압력분포 형태를 보여주고 있다. 그림. 3, 그림. 4에서 편심율이 증가함으로써 동압효과에 의한 공급압 이상의 압력의 크기를 보여주고 있다. 이는 2열 급기 노즐형 외부가압 공기정압 베어링에서 베어링과 저널 사이의 편심이 증가할수록

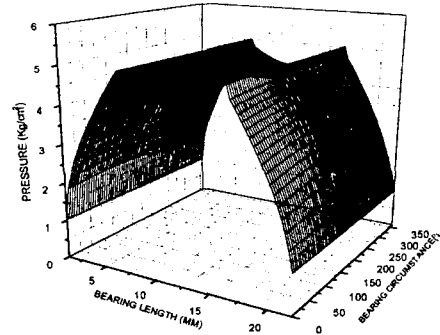


그림 3. 편심률 E=0.1일 때 베어링내 공기압 분포

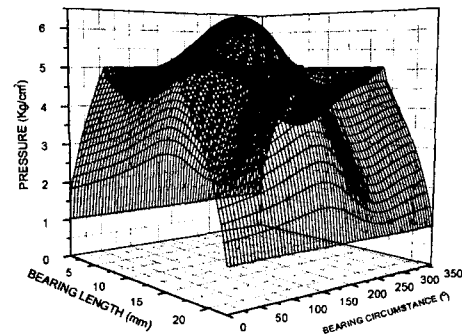


그림 4. 편심률 E=0.4일 때 베어링내 공기압 분포

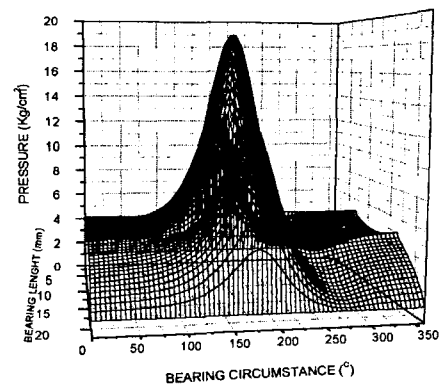


그림 5 편심률 E=0.4일 때 베어링내 공기압 분포

베어링 간극의 크기가 줄어들게 되고, 따라서 쉘기효과에 의한 동압에 의한 압력의 크기가 증가하고 있음을 보여 주고 있다.

그림. 5에서는 편심율이 0.4와 0.5를 지남으로써 일반적인 베어링 설계시 노즐의 위치를 벗

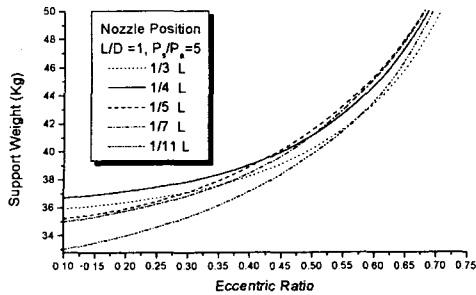


그림 6. L/D=1일 때 노즐 위치에 따른 베어링 부하지지능력

어나는 1/7지점에서 베어링 부하지지능력이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 베어링과 저어널의 편심에 의한 쉐기효과에 의한 압력의 크기가 증가되기 때문인 것으로 생각되어진다.

금형가공을 위한 공기 정압 스피들의 성능을 평가하는데 있어서는 베어링의 강성이 중요한 요소가 된다. 그런데 금형가공시 스피들 자체에서 가공부하에 의한 다이내믹 영향에 의해 베어링과 저널사이에 편심이 지게된다면 편심을 0.4이상에서 부하지지 능력이 우수한 형태의 베어링 설계를 하는 것이 유리함을 이론 해석적으로 분석해보았다.

3. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험장치는 2차원 절삭가공의 모형인 절단 가공형으로 구성되어 있다. 이 실험장치에는 두 개의 레이디얼 베어링사이에 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 절단바이트와 같이 고정된 공구동력계에 의해서 2방향의 힘이 측정되도록 구성되어 있다. 축에는 변위 센서를 설치하여 x방향의 변형을 측정할 수 있게 하였다. 그림 7, 그림 8은 실험장치를 나타낸다.

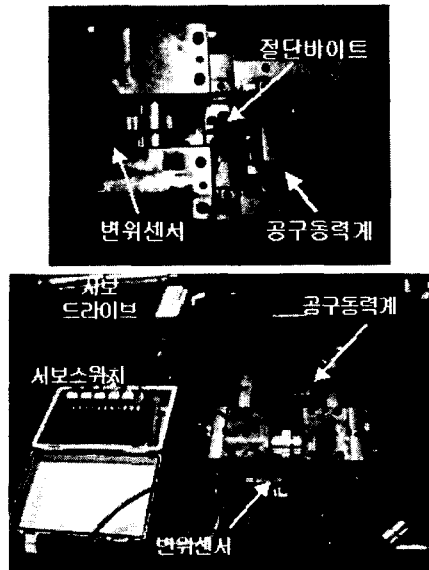


그림 7 실험장치 구성

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 발생하

는 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

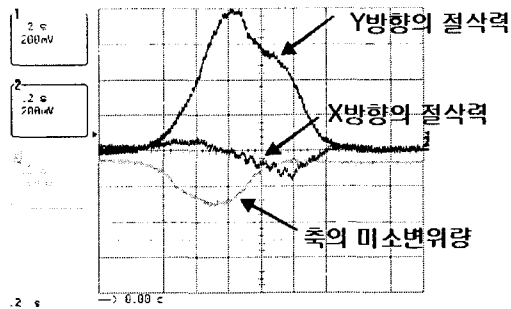


그림 8 절삭력과 변위신호 획득

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

그림 8은 공구 동력계와 변위 센서로 통하여 측정된 실험 결과를 나타내고 있다.

그림 9는 베어링의 급기구 위치에 따라 절삭력과 변위신호와의 변화관계를 나타내었다.

공기베어링에서 유막탄성의 영향으로 인하여 변위신호의 세부적으로 나누어 절삭력을 측정하란 쉽지가 않았다. 우선 절삭가공시 5 μ m, 15 μ m 변위가 발생하였을 때 좀더 신뢰할 수 있는 절삭력을 획득할 수 있었다. 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 쇠기 효과에 의한 압력변화가 있음을 고려하여 급기구 위치 선정이 다시 고려 되어져야 함을 보여주고 있다.

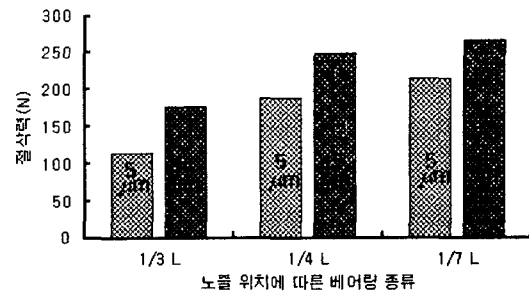


그림 9 베어링 급기구 위치에 따른 절삭력과 변위신호 관계

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.

1. 2열 급기 노즐 베어링 설계시 노즐의 위치 선정이 베어링의 강성화 및 회전 안정성에 영향이 있음을 입증 할 수 있었다.
2. 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.
3. 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.

6. 참고문헌

1. D.V.Singh, R.Sinhasan and S.S.Wadhwa, "Dynamic performance of plain gas journal bearing, " Tribology international, 1984, Vol.15 pp33-41
2. 한 상 욱, 석사학위논문, "외부가압 공기저어널 베어링의 동적계수에 관한 실험적연구", 한국과학기술원.1989
3. 반 종 욱, 석사학위논문 "외부가압기체의

국부조절에 의한 기체베어링의 안정성 향상에 관한 연구”, 한국과학기술원, 1989

4. 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