한국공작기계학회 2000년도 추계학술대회 논문집 pp.466~470

하이브리드 외부가압 공기베어링에서 노즐 위치에 따른 부하지지력 특성

이득우(부산대 기계공학부), 이종렬, 황성철, 이준석(부산대 대학원)

The development of the air-spindle for using to machining the die and mold

Deug-Woo Lee(Pusan Nat'l Univ), Jong-Ryou Lee, Sung-Chul Whang,
Jun-Seok Lee(Gradute School Pusan Nat'l Univ.)

ABSTRACT

Externally pressurized air journal bearing has been widely used in high-speed spindle system and precision machinery because of its characteristics such as substantially low frictional loss, low heat generation and averaging effect leading better running accuracy.
But air journal bearing have a disadvantage of the low load capacity due to the low viscosity. In this paper, The air journal bearing design to overcome the defects of air bearing such as low stiffness and dimping coefficients was investigated theoretically.

Key words- rotational accuracy(회전정도), rotational error(회전오차)

1. 서 론

공기 정압 스핀들에 있어서 공기베어링은 점성이 기름에 비해 매우 작은 공기를 윤활제로 사용하기 때문에 마찰이 적고 고속 회전이 가능하다. 그리고 공기의 안정적 성질로 인해 고온에서 저온까지의 넓은 온도 구간의 환경에서도 사용이 가능하고 방사능 환경에서도 사용이 가능하다. 공기의 압축성은 축과 베어링의 표면 요철이나 형상 오차 등을 어느 정도 습수하는 역할을 하여 운전 정밀도가 우수하다. 이러한 이유로 공기 베어링은 마찰과 회전에 따른 열 발생이 거의 없고 회전 정밀도가 뛰어나기 때문에 고속 회전체나 높은 정밀도를 요구하는 시스템에 많이 사용된다.

반면 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 공진점 까지 진폭이 점차적으로 증가하고 그후 점차 감소하다가 운전 조건에 따라 공진 속도의 두배 이상의 임의의 속도에서 진폭이 급격하게 증가 한다. 이 불안정성을 whirl 불안정성이라 하며, 이것의 발생 속도 이상으로 속도를 높이는 것은 불가능하다.

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. 이완같이 베어링의 형상에 따라 회전안정성에 관한 연구는 지속적으로 연구되고 있다. 그러나 지금현재 까지 공기베어링을 금형가공기를 목적으로한 고강성 공기베어링 설계에 관한 연구는 미흡한 현실에 있다.

본 연구에서는 산업 현장에서 사용할 수 있는 고정밀 고강성 공기스핀들 개발을 위해 2열 노즐 배열 공기정압 베어링에서 급기공간의 거리, 그리고 급기공의 형상에 따라, 즉 강성을 발생시키기 위해 상요되는 유체 저항기의 종류 등에 따른 베어링 강성에 관한 연구를 수행함으로써 2열 노즐 배열 공기정압 베어링에 관한 고강성화 최적 설계조건을 찾아내고, 스핀들 샤프트의 회전 안정성해석을 수행함으로써 초고속 내면연삭기, 미소 구멍가공용 드릴링 머신, 각종 섬유기계, Dental Hand-Piece, 원심 분리기 등의 폭넓은 산업분야에 적용하고자 한다.

2. 공기 베어링 해석

2.1 이론수치해석

공기베어링의 윤활막의 압력분포를 계산하기 위해서 Fig. 와같은 베어링 좌표계에서 공기의 유동을 나타내는 Navier-Stokes방정식과 연속방정식을 연립하여 공기베어링에 대한 레이놀즈 방정식을 유도한다.

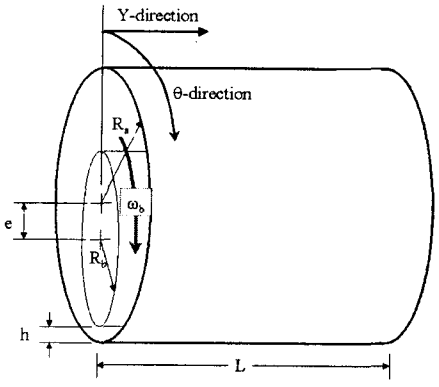

Fig. 1 베어링의 좌표축과 변수

이때 다음과 같은 가정을 하게 된다.

(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.

: 관성력의 영향은 Reynold Number가 증가할수록, 간극비가 클수록 성능에 큰 영향을 줄 것으로 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.

(8) 밀도의 변화는 없다고 가정한다.

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.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(Ph^3\frac{\partial P}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(Ph^3\frac{\partial P}{\partial y}\right) = 6\eta\cdot U_j\cdot\frac{\partial (Ph)}{\partial x} \qquad \text{식 (2.1)}$$

여기서,

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

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

여기서 R : 베어링의 반경

δ : 베어링 원주방향의 좌표

ζ : 베어링 길이방향의 좌표

w : 저어널의 원주속도

P_a : 대기 압력

C : 공기베어링의 간극

r : 저어널의반경

Λ : 베어링 수

아라두고 를 무차원화 하면 다음의 무차원화 된 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial\delta}\left\{\overline{P}\,\overline{h^3}\left(\frac{\partial\overline{P}}{\partial\delta}\right)\right\}+\frac{\partial}{\partial\zeta}\left\{\overline{P}\,\overline{h^3}\left(\frac{\partial\overline{P}}{\partial\zeta}\right)\right\}$$
$$=\Lambda\left(\frac{\partial\overline{P}\,\overline{h}}{\partial\delta}\right) \qquad \text{식 (2.2)}$$

경계조건 선정은 베어링의 양끝단의 조건, 공급구의 조건 그리고 주기조건은 다음과 같다.

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

$$\zeta = \pm L_2/D$$

P=5. at

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

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

레이놀즈 방정식에서 유도된 식은 비선형성을 가지고 있기 때문에 이것을 품기 위해 Newton-Raphson 법을 이용한다.

다음과 같이 finite difference형태로 쓸 수 있다.

$$f_{i,j}(P)=-A\overline{P^2_{i,j}}-B\overline{P_{i,j}}+C\overline{P^2_{i+1,j}}-D\overline{P_{i+1,j}}+$$
$$E\overline{P^2_{i-1,j}}+D\overline{P_{i-1,j}}+F\overline{P^2_{i,j+1}}+G\overline{P^2_{i,j-1}} \qquad \text{식 (2.3)}$$

$$A = \left[\frac{1}{\Delta\theta^2}\left(\overline{h^3_{i+1,j}}+2\overline{h^3_{i,j}}+\overline{h^3_{i-1,j}}\right)+\frac{1}{\Delta\zeta^2}\left(\overline{h^3_{i,j+1}}+2\overline{h^3_{i,j}}+\overline{h^3_{i,j-1}}\right)\right]$$

$$B = \Lambda\left(\frac{1}{\Delta\theta}\right)\left(\overline{h_{i+1,j}}-\overline{h_{i-1,j}}\right)$$

$$C = \frac{1}{\Delta\theta^2}\left(\overline{h^3_{i+1,j}}+\overline{h^3_{i,j}}\right)$$

$$D = \Lambda\left(\frac{1}{\Delta\theta}\right)\overline{h_{i,j}}$$

$$E = \frac{1}{\Delta\theta^2}\left(\overline{h^3_{i,j}}+\overline{h^3_{i-1,j}}\right)$$

$$F = \frac{1}{\Delta\zeta^2}\left(\overline{h^3_{i,j+1}}+\overline{h^3_{i,j}}\right)$$

$$G = \frac{1}{\Delta\zeta^2}\left(\overline{h^3_{i,j}}+\overline{h^3_{i,j-1}}\right)$$

여기서, 해를 품기 위해 Jacobian을 구하면

$$\frac{\partial f_{i,j}(P)}{\partial P}=2\{-A\overline{P_{i,j}}+C\overline{P_{i+1,j}}+$$
$$E\overline{P_{i-1,j}}+F\overline{P_{i,j+1}}+G\overline{P_{i,j-1}}\}-B \qquad \text{식 (2.4)}$$

위 식에 의해 각 Iteration 에서 압력 증분을 구하면

$$\Delta P_{i,j} = -\left(\frac{\partial f_{i,j}(P)}{\partial P}\right)^{-1} f_{i,j}(P) \qquad \text{식 (2.5)}$$

따라서, 다음 Iteration Step에서의 압력은

$$(P_{i,j})_n = (P_{i,j})_{n-1}+\Delta P_{i,j}$$

여기서, 압력에 대한 수렴조건은 다음과 같이 두었다.

$$\frac{\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}|(P_{i,j})_n-(P_{i,j})_{n-1}|}{\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}|(P_{i,j})_n|} \le 1\times10^{-5} \qquad \text{식(2.6)}$$

스핀들 설계시 제작 스핀들의 가공성능을 결정함에 있어서 공기베어링의 설계요소에 따른 부하지지능력의 계산은 필수 적이라 할 수 있다.

스핀들용 공기베어링은 피삭재를 가공하는 동안 절삭저항에 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.

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

본 계산에 있어서 회전방향으로의 등분은 등간격으로 71등분, 축방향으로 등간격으로 68등분을 하여 계산을 행하였다.

$$W_x = \frac{F_{px}}{P_aLD} = -\int_0^L\int_0^{2\pi} P\cos\theta\ R\ dx\ dy$$
식 (2.7)

$$W_y = \frac{F_{py}}{P_aLD} = \int_0^L\int_0^{2\pi} P\sin\theta\ R\ dx\ dy$$
식(2.8)

F_{px} : hybrid pressure force of x axis

F_{py} : hybrid pressure force of y axis

전체 부하지지능력 능력은 다음과 같이 표현이 된다.

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \qquad \text{식(2.9)}$$

2.2 수치해석 결과

Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4에서 보는바와 같이 초기 편심율이 적은 경우 정압에 의한 전형적인 정압 압력분포 형태를 보여주고 있다.

Fig. 3, Fig. 4에서 편심율이 증가함으로서 동압효과에 의하여 공급압 이상의 압력의 크기를 보여주고 있다.

이는 2열 급기 노즐형 외부가압 공기정압 베어링에서 베어링과 저널 사이의 편심증가할수록 베어링 간극의 크기가 줄어들게 되고, 따라서 쇄기효과에

의한 동압에 의한 압력의 크기가 증가하고 있음을 보여 주고 있다.
이와같이 동압효과에 의해서 상승되어지는 압력의 크기에 의해 베어링 전체의 부하지지능력의 변화가 있을 것으로 추정되어지며, 공급구 위치에 따른 변화도 베어링 성능을 결정하는 변수가 된다고 생각한다.

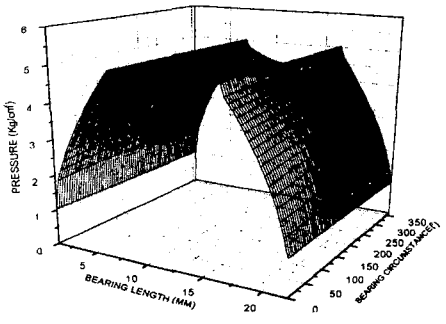

Fig. 2 편심율 E=0.1일 때
베어링내 공기압 분포

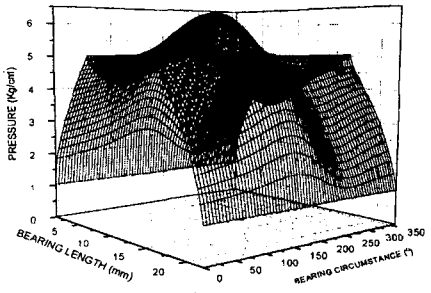

Fig. 3 편심율 E=0.4 일 때
베어링내 공기압 분포

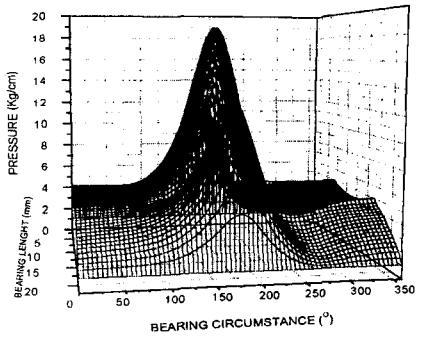

Fig. 4 편심율 E=0.5일 때
베어링내 공기압 분포

공기 베어링의 급기구와 급기구 사이의 베어링 중단부와 베어링 양끝단에 동압에 의한 영향이 있음을 보여 주고 있다.
이러한 동압 효과에 의해서 L/D=1인 경우 편심율이 증가함과 동시 부하지지 능력이 변화하게 되는 경향을 보여주고 있다.
통상 2열 노즐 배치 공기 베어링의 노즐 위치는 베어링 양 끝단에서 베어링 전체의 1/4지점에서 급기공 위치가 결정되는 것으로 되어 있으나 하이브리드 베어링 효과를 가짐으로써 베어링전체에 미치는 동압의 영향에 따른 부하지지능력은 달리 변할 수 있음을 보여주고 있다.
Fig.5 와 Fig.6 에서 보는 것 과 같이 편심율이 0.4와 0.5를 지남으로서 일반적인 베어링설계시 노즐의 위치를 벗어나는 1/7지점에서 베어링 부하지지능력이 증가하는 경향을 보여주고 있다.
이는 베어링과 저어널의 편심에 의한 쇄기효과에 의한 압력의 크기가 증가되기 때문인 것으로 관찰되어 진다.
반면 Fig.7 에서와 같이 L/D=2에서는 통상 설계하는 설계치인 1/4지점의 노즐의 위치에서 베어링 부하지지능력이 우수함을 보여주었다.

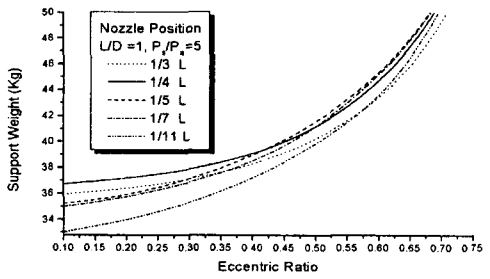

Fig.5 L/D=1일 때 노즐위치에 따른
베어링 부하지지능력

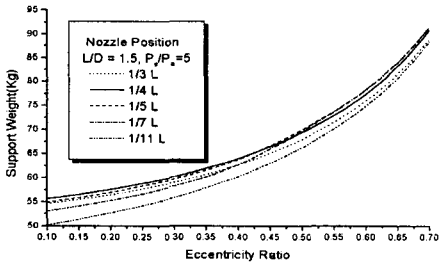

Fig.6 L/D=1.5일 때 노즐 위치에 따른
베어링 부하지지 능력

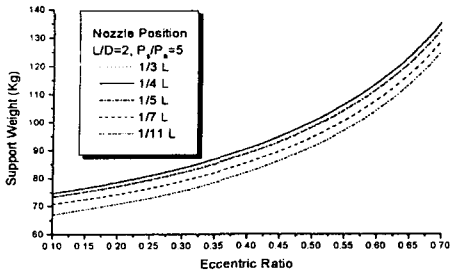

Fig.7 L/D=2일 때 노즐 위치에 따른 베어링 부하지지 능력

따라서 금형가공을 위한 공기 정압 스핀들의 성능을 평가하는데 있어서는 베어링의 강성이 중요한 요소가 되는데, 금형가공시 스핀들 자체에서는 가공부하에 의한 다이나믹 영향에 의한 베어링과 저널사이에 편심이 지게된다면 편심율 0.4이상에서 부하지지 능력이 우수한 형태의 베어링 설계를 하는 것이 유리함을 이론 해석적으로 분석해 보았다.

4. 향후 연구 계획

우수한 강성을 보유한 그리고 내구성을 지닌 공기정압 스핀들을 설계 및 제작으로 위하여 스핀들 전체의 배열 위치 선정 및 베어링 요소설계에 있어서 여러 가지 매개 변수를 통하여 실험적 조사를 통하여 이론적 근거와 실험적 경험치를 비교 분석함으로써 금형가공용 공기정압스핀들로서 기술경쟁력을 가지고자 한다.

앞에서 분석해 보았던 베어링 설계요소중 노즐과 노즐간의 거리에 따른 베어링 강성의 크기와 노즐의 형태에 따라 변수를 정하여 Fig.8 과 같이 실험적으로 분석함으로써 최적 베어링 설계 조건을 선정하고자 한다.

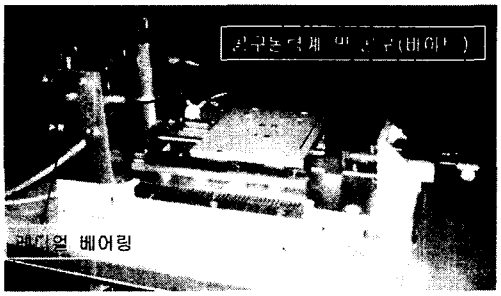

Fig 8. 베어링 최대 강성 설계조건을 찾기 위한 실험장치도

5. 결 론

외부 가압 공기 정압 베어링의 고강성화 설계조건 선정을 위한 이론적 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

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.

참고 문헌

1.C.H.T.Pan, B.Sternlicht, "On the Translatory Whirl of a vertical Rotor in Plain Cylindercal Gas-Dynamic Journal Bearings", Journal of Basic Engineering, March 1962, PP.152-158.

2.R.H.Larson, H.H.Richardson, "A Preliminary Study of Whirl Instability for Pressurized Gas Bearing",Journal of Basic Engineering,Dec.1962,P.P511-520

3.C.H.Pan, B.Stenrnlicht, "Comparison between Theories and Experiments for the Threshold of Instablility fo Rigid Rotor in Senf-Acting,Plain-Cylindrical Journal Bearings",Journal of Basic Engineering,June 1964,pp.321-327.

4.Taniguchi,O.,"Experimental Study on Instability of Externally Pressured Air Journal Bearing",JSME Trans.(in Japanese),Vol.33,NO250,1967,pp997-1004

5.김금모,"외부 가압 공기 저어널 베어링의 안정성 및 회전정밀도에 관한 연구", 한국과학 기술원 박사 학위논문,1992