

고속 내면 연삭기 주축용 원추형 자기베어링 설계 연구

노승국*, 경진호, 박종권(한국기계연구원), 최언돈(성림(주)),
양승준(중앙대학원), 이재응(중앙대), 김남용(충남대대학원), 이동주(충남대)

Study on Design of Cone-Shaped Magnetic Bearing Spindle System for High Speed Internal Grinding

S. K. Ro, J. H. Kyung, J. K. Park(KIMM), U. D. Choi(Sung Rim Co.),
S. J. Yang, J. E. Lee(Chung-Ang Univ.), N. Y. Kim, D. J. Kim(Chungnam Nat'l Univ.)

ABSTRACT

A cone-shaped active magnetic bearing spindle system for high speed internal grinding is designed and tested. The cone-shaped AMB system consists of only 4 couples of magnet, it can be smaller and lighter than conventional radial-axial-type AMB system. In this paper, the cone-shaped electromagnets are designed by magnetic circuit theory, and de-coupled direct feedback PID controller is applied to control the coupled magnetic bearings. The designed cone-shaped AMB spindle system is built and constructed with a digital control system, and tested its stability and dynamic performances. As the results of the tests, this spindle runs up to 40,000 rpm with about 5 μ m of runout, and the AMB system provides high damping ratio eliminating overshoot and resonance speed.

Key Words : Cone-Shaped Active Magnetic Bearing (원추형 자기베어링), High Speed Internal Grnder (고속 내면 연삭기), Digital Control (디지털제어),

1. 서론

자기력을 이용한 비접촉 부상방식의 자기베어링 시스템은 마찰이 없는 고속회전을 가능하게 하며, 능동 제어의 필요성에 의한 고감도의 진동특성이나, 능동 진동제어 특성 등으로 많은 고속 회전기계 분야에 적용되고 있으며 적용범위가 더욱 넓어지고 있다. 공작기계 분야에도 국외에는 초고속 밀링 스피인들과 내면 연삭용 주축계를 대표적으로 여러 제품들이 출시되고 있다.

일반적인 반경방향과 축방향 자기베어링으로 이루어진 시스템과는 달리 반경방향 베어링의 자극면에 경사각을 적용한 원추형 자기베어링을 사용하는 경우, 별도의 축방향 자기베어링을 없앨 수 있으므로 액튜에이터의 개수가 줄면서 주축의 구조가 간단해질 수 있다.

이러한 원추형 자기베어링은 원추각의 크기에 따라 축방향과 반경방향의 하중지지력의 비율을 결정하게 되는데 축방향 하중이 크지 않은 경우에 적용하는 것이 바람직하므로 고속 회전이 필요하면서 주

로 반경방향의 절삭력이 작용하는 내면 연삭기에 적용하기에 적합하다.

외국의 경우 S2M에서 원추형 자기베어링을 적용한 연삭기 주축을 개발하여 실제 자동차 부품 가공용으로 사용하고 있는 등^[1], 여러분야에 적용되고 있으며 국내에서는 과학기술원에서 로봇 팔 지지용으로 원추형 자기베어링이 연구된 바 있고^[2], 고속 주축계를 위하여 연구된 것은 본 연구가 처음이다.

본 연구에서는 원추형 자기베어링을 이용한 연삭기 주축계의 자기베어링 및 제어 시스템을 설계하고 주축계를 제작하고 디지털 제어시스템을 구성하여 시스템의 안정성과 40,000 rpm 까지의 회전 특성 등 동특성을 평가하여 원추형 자기베어링의 내면연삭기 적용이 유용함을 보였다.

2. 원추형 자기베어링 시스템 설계

2.1 원추형 자기베어링을 이용한 내면 연삭기

Fig.1 에는 본 연구에서 설계한 내면 연삭기 주축계의 그림이 나타나 있다. 중앙의 내장형 모터는

75kW의 최대 속도 50,000 rpm 의 모터이며 로터의 직경은 55mm 이다. 앞, 뒤에 각각 원추형 자기베어링이 위치하고 있으며 각각의 x 및 y 방향 변위센서와 축방향 변위센서로 구성되어 있다.

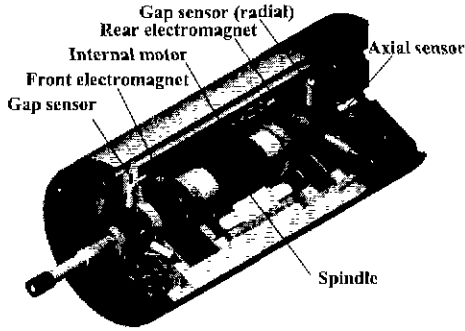


Fig. 1 The high speed spindle system with cone shape magnetic bearing for internal grinding

2.2 원추형 자기베어링의 전자기력

Fig.2의 원추형 자기베어링 액튜에이터에서 원추각을 자속은 자극면에 수직인 방향으로 작용하고 절심에서의 자기저항을 무시할 경우의 자극면에 수직인 방향의 자기력 F_m 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_m = \frac{A_g}{2\mu_0} B_m^2 \quad (1)$$

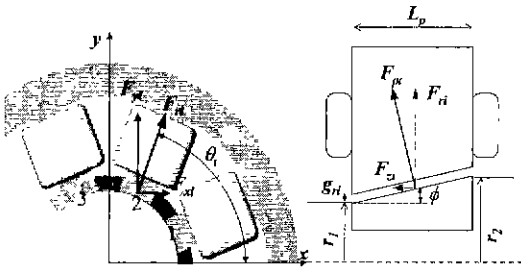


Fig.2 Magnetic force on a cone shape magnetic bearing

이때, i 는 각극의 개수에 따라 1에서 8의 값을 가지며 반경방향과 축방향의 자기력은 (2)와 같다

$$F_{zi} = F_{mi} \sin \phi = \frac{A_g}{2\mu_0} B_{mi}^2 \sin \phi \quad (2)$$

$$F_{ri} = F_{mi} \cos \phi = \frac{A_g}{2\mu_0} B_{mi}^2 \cos \phi \quad (3)$$

여기서 각 극에서의 x, y 방향 자기력은,

$$F_x = F_r \cos \theta_i = \frac{B_{mi}^2}{2\mu_0} A_r \cos \theta_i \quad (4a)$$

$$F_y = F_r \sin \theta_i = \frac{B_{mi}^2}{2\mu_0} A_r \sin \theta_i \quad (4b)$$

이며, 각 공극의 크기는 변위 x, y, z에 의하여 다음 (5)와 같이 나타내어지며,

$$g_n = g_{n0} - \tan \phi z_i - \cos \theta_i x_i - \sin \theta_i y_i \quad (5)$$

자극에서의 자속밀도는 자기회로 해석법을 이용하여 다음과 같다.

$$2NI = 2\Phi \frac{g_m}{\mu_0 A_p}$$

$$B_m = \frac{\Phi}{A_m} = \frac{\mu_0 NI_i}{g_{pi}} = \frac{\mu_0 NI_i}{g_n \cos \phi} \quad (6)$$

$$A_r = A_p \cos \phi, \quad g_n = g_{pi} / \cos \phi$$

여기서 $A_r = A_g \cos \phi = L_p \times W_p$ 로 반경방향의 면적이며 N 은 감은 수, I_i 는 각 극의 전류이다. 한 쪽의 베어링에서 작용하는 반경방향 및 축방향의 자기력은 8개 극의 성분의 합으로 나타내어진다.

$$F_z = \sum F_{zi}, \quad F_x = \sum F_{xi}, \quad F_y = \sum F_{yi} \quad (7)$$

2개의 자극을 쌍으로 연결하여 제어하는 경우 각 자극의 전류는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_1 = I_8 = I_0 + I_z + I_x, \quad I_2 = I_3 = I_0 + I_z + I_y$$

$$I_4 = I_5 = I_0 + I_z - I_x, \quad I_6 = I_7 = I_0 + I_z - I_y \quad (8b)$$

이 경우 전자기력을 변위가 0인 점과 제어전류가 0 일 때 다음과 같이 선형화하여 나타낼 수 있으며 각 방향의 전류 및 변위 강성은 식(10)과 같다.

$$F_x = F_{x0} + K_{xx}x + K_{xy}I_x \quad (9a)$$

$$F_y = F_{y0} + K_{yy}y + K_{yx}I_y \quad (9b)$$

$$F_z = F_{z0} + K_{zz}z + K_{zz}I_z \quad (9c)$$

$$K_x = K_y = \frac{4\mu_0 A_r a^2 I_0^2}{g_{n0}^3 \cos^2 \phi} \quad (10a)$$

$$K_{zx} = K_{zy} = \frac{4\mu_0 A_r a^2 I_0}{g_{n0}^2 \cos^2 \phi} \quad (10b)$$

$$K_z = \frac{8\mu_0 A_r \tan^2 \phi I_0^2}{g_{r0}^3} \quad (10c)$$

$$K_{\alpha z} = \frac{8\mu_0 A_r \tan^2 \phi I_0}{g_{r0}^2} \quad (10d)$$

여기서, $\alpha = \cos(\pi/16)$

2.3 액츄에이터 제원 설계

원추형 자기베어링 전자석 액츄에이터의 제원 설계는 모터 동력을 고려한 최대 연삭력을 기준으로 이루어져 정격출력 75kW가 30,000rpm에서 모두 걸삭력으로 전달될 때 토크는 약 1 Nm 이고, 이때의 연삭력은 200N으로, 연삭력과 주축의 자중이 같은 방향으로 작용할 때 앞쪽 베어링에서의 하중은 약 400N, 뒤쪽 베어링의 하중은 약 200N으로 계산된다. 최대 자속밀도 B_{max} 값을 규소강판의 B-H 곡선상에서 선형구간의 최대점의 자속밀도 1.3T으로 설정하면 반경방향 앞 질의 계산식들을 바탕으로 주요 제원을 결정할 수 있다. 본 연구에서의 바이어스 자속밀도는 재료의 B-H곡선상에서 선형 영역의 중간점을 기준으로 하여 0.75T로 설정하였다.^[4]

원추각도의 크기는 베어링의 반경방향과 축방향 하중 지지능력의 비율 나타낸다. 내면 연삭 과정의 경우 축방향으로 작용하는 연삭력이 반경방향보다 매우 작으므로 즉 1/5 이하의 하중으로 설계하여 앞쪽 베어링의 각도를 15°, 뒤쪽 베어링의 각도를 20°로 설계하였다. 설계된 자기베어링의 제원은 Table 2와 같다.

Table 1 Designed cone shape magnetic bearings

Item	Front Bearing	Rear Bearing
air gap, g_0 [mm]	0.5	0.5
radial area of a pole, A_r [mm ²]	300	200
rotor radius 1, r_1 [mm]	20.5	20.5
rotor radius 2, r_2 [mm]	25	25
number of turn, N [times]	80	80
bias current(flux=0.75[T]), I_0 [A]	3.5	3.5
radial current gain, K_w [N/A]	98	56
radial position gain, K_x [N/m]	0.73×10^9	0.45×10^9
axial current gain, K_z [N/A]	27	27
axial position gain, K_z [N/m]	28000	49000

3 원추형 자기베어링 제어시스템 설계

3.1 직접 궤환제어 모델

원추형 자기베어링 주축계는 축방향과 반경방향의 제어력이 연성이 되어있다. 그러나 원추형 자기베어링에서의 자기력은 축의 위치가 원점이고 제어

전류가 0인 선형화 점에서 축방향과 반경방향은 수학적으로 비연성화된다. 즉,

$$\frac{\partial F_x}{\partial z} = \frac{\partial F_x}{\partial I_x} = \frac{\partial F_z}{\partial x} = \frac{\partial F_z}{\partial I_x} = 0$$

at $x=0, z=0, I_x=0, I_z=0$ (11)

따라서 5개의 센서에서 측정되는 각각의 반경방향과 축방향의 위치를 1자유도로 직접 궤환 제어하는 방법을 본 연구에서는 적용하였으며 이를 그림으로 나타내면 Fig. 3.과 같다.

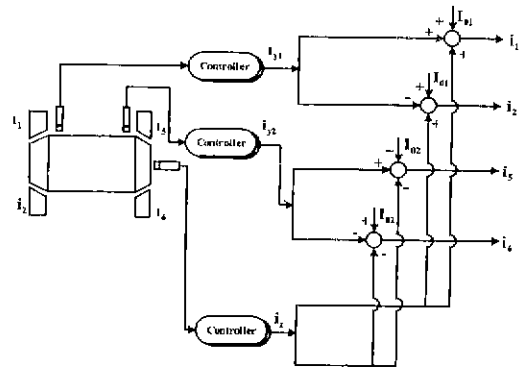


Fig. 3 Direct feedback scheme of cone-shaped magnetic bearing system

3.2 PID 제어기 설계

1 자유도 모델에 대한 블록 선도는 다음의 Fig.4와 같이 나타내어질 수 있다.

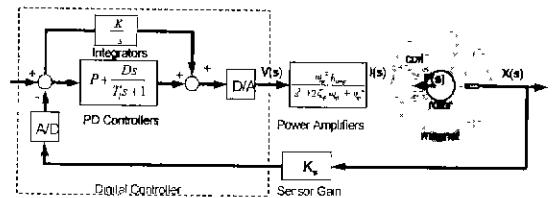


Fig.4 Block diagram of 1-dof feedback control system

각 자유도에 해당하는 등가질량을 m , 라고 하고, 전력증폭기에서의 동특성을 무시할 때, 외력 $f(s)$ 에 대한 변위 $x(s)$ 의 전달함수는 다음과 같이 등가의 질량-강성-감쇠 시스템으로 모델링 되어 제어게인 P, D를 설정할 수 있다

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{m_s^2 + K_{amp}K_sK_{\alpha z}Ds + K_{amp}K_sK_{\alpha z}P - K_x} \quad (12)$$

시스템의 안정성을 보장하기 위해서는 다음의 조건을 만족시켜야 하며 시스템의 감쇠비는 미분계인

에 따라 크게 할 수 있다.

$$K_{amp}K_sK_xP - K_x > 0 \quad (13)$$

$K_{amp} = 1$ [A/V], $K_s=10000$ [V/m] 로 설계되어진 제어계인은 앞베어링의 반경방향의 경우 $P=1.0\sim1.5$, $D=0.001\sim0.002$. 뒷베어링의 반경방향은 $P=0.9\sim1.2$, $D=0.0007\sim0.001$ 이고, 축방향의 경우는 $P=0.2\sim0.3$, $D=0.0001\sim0.0004$ 이다. 축방향의 변위강성이 반경방향에 비하여 1/10 정도로 작으므로 축방향 제어계인도 작게 설정하였다.

4. 원추형 자기베어링 회전축 실험

4.1 실험 시스템 제작 및 구성

설계된 시스템을 제작하여 Fig. 5와 같이 구성하였다. 제작된 주축은 원추형 자기베어링 코어 및 로터 코어를 적층판을 사용하였고, 로터는 외경연삭과정을 수행하였다. 본 연구에서 제어시스템은 DSP (TMS320C6702)를 이용한 디지털 제어시스템을 적용하였으며 각각 100kHz의 A/D와 D/A로 구성되어 있다. 변위센서는 와전류형 센서로 분해능 0.1 μm , 대역폭 80kHz의 특성을 가지며, 전력 증폭기로 사용되는 스위칭 앰프는 대역폭이 약 2.5kHz로 튜닝되어 있다.

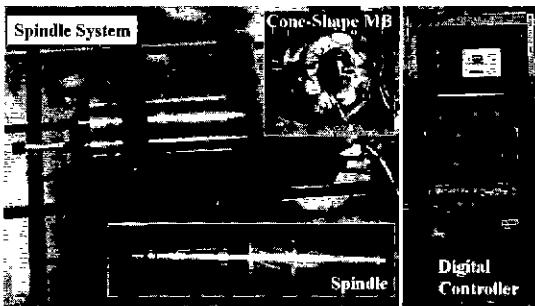


Fig. 5 Manufactured cone-shape magnetic bearing spindle system

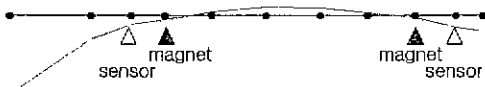


Fig. 6 mode shape of the spindle (983 Hz)

Fig.6에는 제작된 스피들의 진동 모드 해석 결과를 나타내고 있다. 1차 고유진동수가 연삭철이 있는 경우 약 980Hz 로써 50,000 rpm 까지의 회전에는

문제가 없는 것을 알 수 있다

4.2 자기베어링 시스템 안정성 실험

원추형 자기베어링 시스템의 안정성을 제어계인의 안정영역 측정으로 수행하였다. 각 방향에 대한 결과가 Fig.7에 나타나 있다. 앞 베어링과 뒷베어링의 반경방향 제어계인 안정영역에 비해 축방향의 제어안정영역이 작게 나타났으며 축방향의 제어계인이 커지는 경우 반경방향과의 연성효과 때문에 반경방향 안정성에 영향을 주는 결과를 보였다. 또한 뒷베어링 경우는 미분계인이 커짐에 따라 고주파의 유연모우드가 가진되는 특성을 보였다

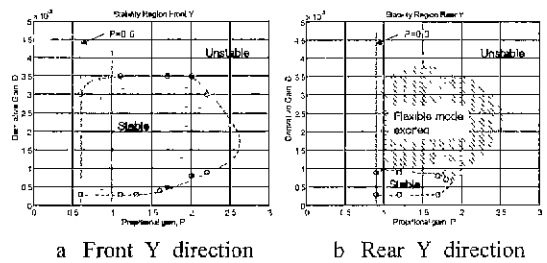


Fig. 7 Stability boundary of radial magnetic bearings

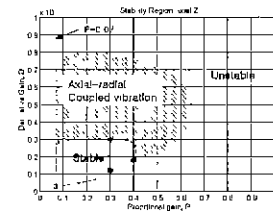


Fig. 7c Stability condition of axial motion

안정성을 고려하여 제어계인을 앞베어링의 경우 $P=1.1$, $D=0.001$, 뒷베어링은 $P=1.0$, $D=0.0007$, 축방향은 $P=0.2$, $D=0.0002$ 로 설정하였다.

4.3 부상응답 및 외란응답 특성

설정된 계인에서의 앞쪽 반경방향의 부상응답은 Fig. 8과 같다. 과감쇠의 특성을 보이고 있어 과도응답이 매우 적으며 자력진동이 없음을 알 수 있으며, 부상시의 응답을 확대한 경우 약 1 μm (0.01V) 이하의 노이즈 레벨을 보이고 있음을 알 수 있다 Fig.9a의 뒷베어링 반경방향의 경우도 과감쇠의 특성을 보이고 있으며 Fig.9b에서 제어계인이 적은 축방향의 경우는 감쇠비가 0.25 정도로 다소 낮음을 알 수 있다.

Fig.10은 축 선단의 충격 가진에 의한 앞쪽 반경방향 센서의 전달함수를 나타낸 것으로 고주파의 유연모우드 까지는 증폭성분이 없는 감쇠가 큰 시스템임을 확인할 수 있다

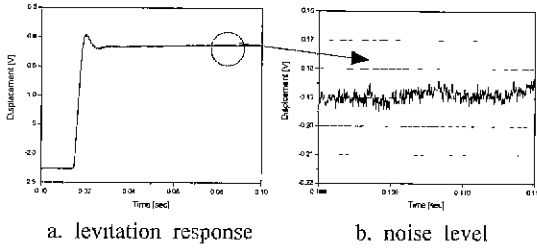


Fig. 8 Levitation response of front Y direction

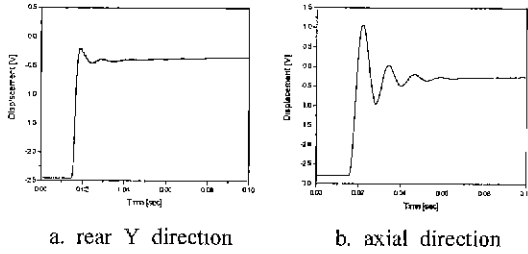


Fig. 9 Levitation responses

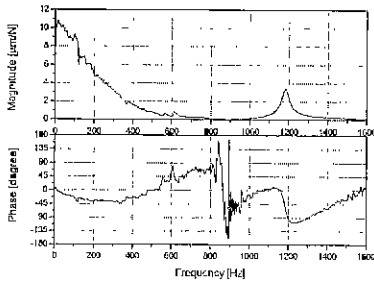


Fig. 10 Frequency response of front Y direction by impact on front end (without grinder wheel)

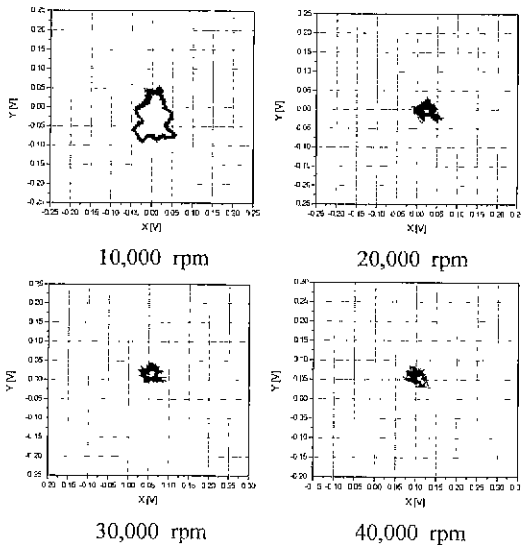


Fig. 11 Runout response of rotation ($5\mu\text{m}/\text{div}$)

4.4 회전응답 특성 실험

Fig.11은 40,000 rpm까지의 회전시 앞 베어링 센서의 런아웃을 나타낸 것이다. 회전속은 G0.4급 이하로 밸런싱되어 있으며, 그 결과 질량 불균형에 의한 가진의 영향은 없어 고속회전에서도 응답의 크기는 커지지 않았으며, 30,000 rpm 이상에서의 런아웃이 앞베어링 센서에서 약 $5\mu\text{m}$ (0.05V) 이하로 나타났다. 센서 부분의 런아웃 효과를 제거하거나 강성을 증가시킬 경우 더욱 정밀한 회전이 가능할 것으로 보이며, 고감도의 특성으로 강체모우드 회전수의 공진현상은 발생하지 않았다.

5. 결론

본 연구에서는 고속 내면 연삭기용 원추형 자기베어링 시스템의 원추형 자기베어링 액츄에이터를 비롯한 하드웨어를 설계하고, 원추형 자기베어링 제어시스템으로 비연성 직접 궤환방식의 PID 제어시스템을 설계하였다. 또한 설계된 주축계의 실험 시스템을 제작하고 디지털 제어시스템을 구성하여 실험한 결과 비연성시진 직접 궤환제어를 통한 PID제어기가 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있었다. 여기서, 제작된 시스템의 안정성 분석, 부상 실험 및 외란 실험을 수행하여 반경방향에 고감도의 특성을 갖도록 설정하였으며 축방향에도 충분한 안정성을 제공하였다. 회전실험 결과 40,000 rpm까지의 고속회전이 가능하였으며 런아웃 $5\mu\text{m}$ 이내의 정밀한 회전 특성을 보여 내면 본 연구의 원추형 자기베어링 시스템이 내면 연삭기 적용이 유용함을 보였다.

향후, 시스템의 고강성화 및 연성효과를 고려한 제어, 신뢰성 향상등을 연구하여 고속화 및 정밀화를 이한 연구를 진행하고 상품화가 가능한 기술을 확립할 예정이다

참고문헌

1. Maurice Burnet, bruno Wagner, "Analysis of the Performance of an AMB Spindle in Creep Feed Grinding", 4th ISMB, pp519-524, 1994
2. Ho-Seop Jeong, Chong-Won Lec, "Robust Motion Control of the Frictionless positioning Device Suspended by Cone-Shaped Active Magnetic Bearings". 5th ISMB, pp59-64, 1996
3. Jussi K. Lahteenmaki, Erkki J. Lantto, "Optimization of the Conical Angle of Cone-Shaped Active Magnetic Bearings", 6th ISMB, pp223-233, 1998
4. 박종권, 노승국, 안대균, "연삭기용 자기베어링 주축계의 고속화에 관한 연구", 한국정밀공학회 논문집, 15권 3호, pp233-243, 1998