

자기베어링 적용 공작기계용 고속 스피들 개발

Development of High Speed Spindle for Machine Tool with Magnetic Bearings

박철훈[†]·함상용^{*}·홍두의^{*}·김준규^{**}

Cheol Hoon Park, Sang Yong Ham, Doo Euy Hong and Jun Kyu Kim

(Received November 12, 2015 ; Revised November 12, 2015 ; Accepted November 25, 2015)

Key Words : Machine Tool Spindle(공작기계 스피들), High Speed Spindle(고속 스피들), Magnetic Bearings(자기 베어링)

ABSTRACT

Most of spindles for machine tool are supported by ball bearings, and there are problems in the limits of high speed and high power as well as the cumbersome maintenance due to the short life time. In order to overcome these problems of the conventional spindles, the high speed spindle with magnetic bearings is developed in this study. Magnetic bearings for 60 000 r/min class high-speed spindle are designed, and high speed spindle with magnetic bearings are fabricated. Based on the running test up to 60 000 r/min, it is verified that the spindle is stably supported by the magnetic bearings, and the magnitude of the unbalance response at 60 000 r/min is less than 3 μm .

1. 서 론

공작기계용 스피들을 고속화시킴으로써 공작기계의 생산성과 정밀도를 향상시키려는 관심이 높아지고 있으며, 이에 따라 고속 가공기술에 대한 연구가 폭넓게 진행되고 있다. 공작기계용 고속스피들은 반도체 소재 천공, 스마트폰 금속케이스(metal case)의 가공 등 고부가가치를 제품의 가공정밀도 및 가공속도 향상을 위해 고속화, 고출력화하고 있는 추세이다. 기존 수만 r/min급의 고속 스피들은 주로 볼베어링이 적용되고 있다. 볼베어링은 $1.0 \times 10^6 \text{ DN} \sim 2.0 \times 10^6 \text{ DN}$ (DN number : 베어링내경(mm) \times 회전속도(r/min))에 불과한 선속도의 한계를 가지고 있고 이로 인해 스피들의 고속화 및 고출력화의 한계, 짧은 수명으로 인해 번거로운 유지보수의 문제를 가지고 있다.

이에 반해 자기베어링은 자기력에 의해 회전체를 부상시켜 비접촉으로 회전체를 지지하는 베어링이다. 볼베어링에 비교하여 선속도를 2~3배 이상 향상시킬 수 있기 때문에 스피들의 고속화에 적합하며, 회전체의 직경을 크게 할 수 있어 스피들의 고출력화가 가능하다⁽¹⁻⁴⁾. 이 논문에서는 스피들의 고속화, 고출력화를 위해 자기베어링이 적용된 고속스피들의 설계 및 구동실험 결과를 제시한다⁽⁵⁻⁷⁾.

2. 스피들 로터 및 자기베어링 설계

2.1 스피들 가공 시 베어링 지지력 계산

이 연구에 적용된 스피들용 모터는 정격속도 60 000 r/min에서 출력 6 kW, 토크 1 N·m의 유도모터이다. 자기베어링을 설계하기 위해서는 스피들 가공 시에 발생하는 공구의 가공력을 지지해야하는

[†] Corresponding Author ; Member, Korea Institute of Machinery & Materials

E-mail : parkch@kimm.re.kr

^{*} Korea Institute of Machinery & Materials

^{**} STA inc.

[#] A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2015 Annual Autumn Conference

[‡] Recommended by Editor Heung Soo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

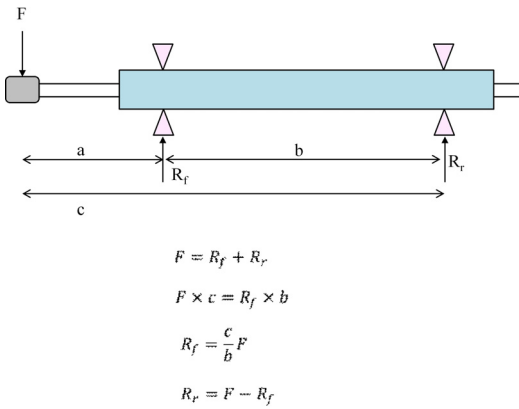


Fig. 1 Relationship between machining force and bearing forces

베어링의 최대 지지력을 파악하여야한다. 이는 스피ndl들의 가공 시 작용하는 가공력을 이용하여 계산가능하다. 모터의 발생토크가 모두 가공에 적용된다고 가정하면 최대 가공력을 계산할 수 있는데, 모터의 발생토크가 1 N-m, 공구의 직경이 17 mm이므로 최대 가공력은 약 118 N이다. 이 결과와 Fig. 1의 관계를 이용하면 전방베어링에는 약 173 N, 후방베어링에는 약 55 N의 힘이 적용될 것으로 예측되었다.

2.2 스피ndl 적용을 위한 축방향 자기베어링 설계

공구의 최대가공력이 모두 축방향 하중으로 작용할 수 있는 상황 및 회전축의 하중을 지지하기 위한 힘을 모두 고려하여 축방향 요구력을 200 N으로 선정하였다. 여기에 안전율 2를 적용하여 축방향 자기베어링의 설계 요구력은 -400 N ~ 400 N의 범위로 선정하였다. 축방향 자기베어링은 Fig. 2와 같은 구조의 축방향 착자 링형 영구자석이 적용된 하이브리드 축방향 자기베어링(AM-HMB, axially magnetized-hybrid thrust magnetic bearing)으로 설계하였다⁽⁸⁾. AM-HMB의 링형 영구자석에서 나온 자속이 쓰러스트 칼라 윗면과 아랫면의 공극을 통과한 후 자성체 코어를 거쳐 영구자석으로 돌아가는 바이어스 자속(bias flux)을 형성한다. 축방향 자기베어링 고정자는 내경 52 mm와 외경은 121 mm이며, 쓰러스트 칼라는 직경 68 mm와 두께 8 mm, 영구자석은 두께 6 mm, 높이는 8 mm, 코일 턴수는 70 턴이다. Fig. 3에 전자기장 유한요소 해석 상용 소프트웨어

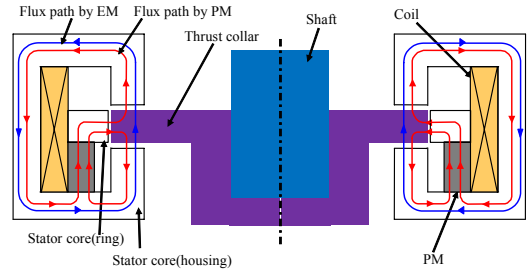


Fig. 2 Configuration of thrust magnetic bearing for spindle

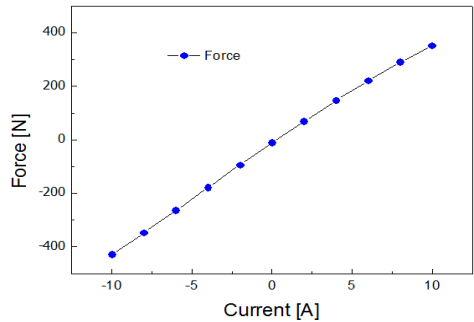


Fig. 3 Prediction results of axial force of thrust magnetic bearing depending on current

인 ANSYS MAXWELL V.16을 이용하여 축방향 힘을 예측한 결과를 나타내었다. 설계치와 해석 결과를 비교하였을 때, 설계된 축방향 자기베어링은 설계 요구력을 만족할 것으로 예측되었다.

2.3 스피ndl 적용을 위한 반경방향 자기베어링 설계

앞서 계산된 스피ndl 가공시의 베어링 지지력 계산결과에 따라 전후방 반경방향 자기베어링의 설계 요구력은 각각 173 N, 55 N으로 선정하였다. 반경방향 자기베어링은 Fig. 4의 구조와 같은 하이브리드 호모플라 자기베어링으로 설계 하였다^(1,2). 전방 및 후방 반경방향 자기베어링 고정자의 내경/외경은 각각 50.3mm / 108 mm, 48.8 mm / 98 mm이며, 턴수는 각각 100, 70 턴이다. 자석의 두께는 1 mm이고 회전체와의 공극은 0.4 mm이다. Figs. 5, 6은 전자기장 유한요소 해석을 이용하여 전/후방 베어링의 반경방향 힘을 예측한 결과를 나타내었다. 설계치와 해석 결과를 비교하였을 때, 설계된 반경방향 자기베어링들은 설계 요구력을 만족할 것으로 예측되었다.

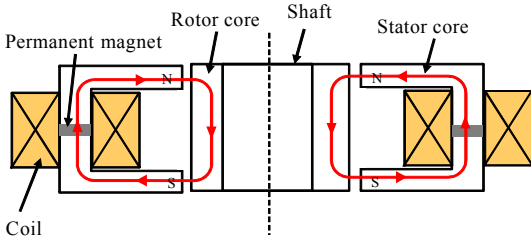


Fig. 4 Configuration of radial magnetic bearing for spindle

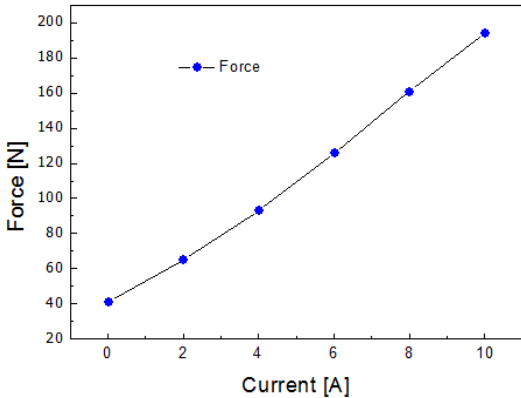


Fig. 5 Prediction results of radial force of front radial magnetic bearing depending on current

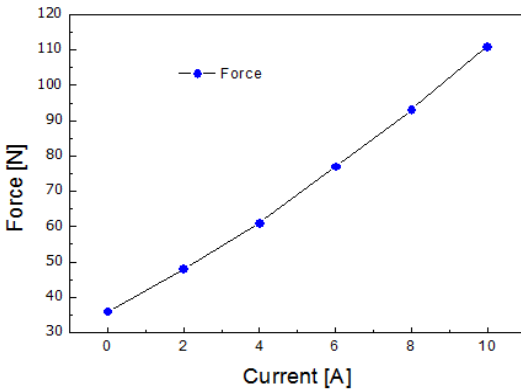


Fig. 6 Prediction results of radial force of rear radial magnetic bearing depending on current

2.4 스펀들 적용을 위한 로터 설계

자기베어링으로 지지되어 회전하는 회전체는 다 음과 같이 구성된다. 샤프트의 중앙에 고주파 유도 모터용 코어가 열박음 되며, 샤프트의 한쪽 끝단에는 가공용 톨이 장착되고 또 다른 끝단에는 축방향

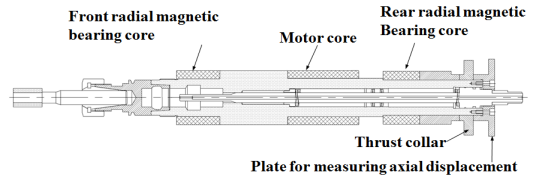


Fig. 7 Configuration of rotor for spindle

자기베어링용 자속(magnetic flux)이 통과할 수 있는 쓰러스트 칼라(thrust collar)가 장착된다. 또한 샤프트 상하부에 반경방향 자기베어링용 자성체 코어(magnetic core)가 열박음되어 고정된다. 샤프트에 열박음에 의해 일체형으로 조립되고 자기베어링용 자속의 경로를 제공해주는 자성체 코어의 재질로는 일반적으로 투자율이 높은 순철이 사용된다. 그러나 순철은 항복강도가 50 MPa로 낮기 때문에 스펀들과 같은 고속회전체에 적용하기에는 위험하다. 따라서 이 연구에서는 투자율은 순철에 비해 낮지만 항복강도가 490 MPa로 순철보다 10배 이상 높아 고속회전체에 적용하기 적당한 S45C를 자성체 코어의 재질로 선정하였다. 60 000 r/min의 원심력조건에서도 안전율이 확보되도록 외경, 자성체 코어의 내경과 외경, 열박음 직경 간섭량을 반복적인 해석을 통해 40 μm로 선정하였다. 앞서 설계한 전후방 반경방향 자기베어링 및 축방향 자기베어링용 코어의 설계 결과를 반영하여 스펀들용 로터의 레이아웃을 Fig. 7 과 같이 설계하였다. 회전체 유한요소 해석을 통해 free-free 조건의 1차 굽힘모드 주파수는 1346 Hz로 예측되었다. 1차 굽힘모드 위험속도는 88 000 r/min으로 예측되어 최대동작회전속도 60 000 r/min에 비교하였을 때 45% 이상의 분리여유를 가지고 있는 것으로 예측되었다. 보통 회전체 설계에 있어 동작 속도는 위험속도와 30% 이상의 분리여유를 가지도록 설계하는 것을 고려해보면, 설계된 스펀들용 회전체는 충분한 분리여유를 가지고 설계된 것으로 볼 수 있다.

2.5 자기베어링 적용 고주파스핀들 설계

로터 및 자기베어링 설계 결과를 바탕으로 Fig. 8 과 같이 자기베어링이 적용된 고주파스핀들을 설계 하였다. 제작성, 조립성 등을 고려하여 축방향 변위 측정용 플레이트(plate)의 위치를 회전체의 맨 후면에 배치하였다. 로터에서 모터 코어부의 외경은

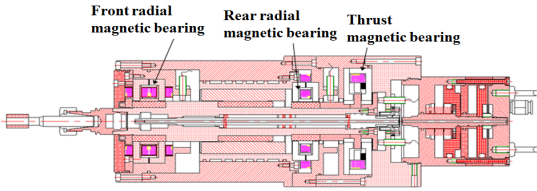


Fig. 8 Layout of high speed spindle with magnetic bearings

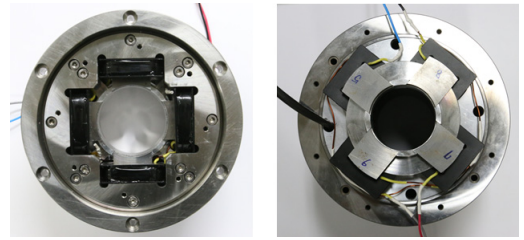


Fig. 9 Assembled radial magnetic bearings

49.5 mm이며 가공 툴부분을 제외한 로터 몸체의 길이는 299 mm이다.

3. 스피들 제작 및 회전실험

3.1 자기베어링 적용 스피들 제작

자기베어링 적용 고속스핀들 설계 결과에 따라 시제품을 제작하였다. Figs. 9, 10에 조립된 반경방향 자기베어링 및 축방향 자기베어링의 사진을 나타내었으며, Fig. 11에 제작된 로터의 임팩트 테스트 (impact test)를 위해 거치된 사진을 나타내었다. 임팩트 테스트 결과 free-free 조건의 1차 굽힘모드 주파수는 1371 Hz로 측정되어 해석결과와 유사한 결과를 보였다. Fig. 12에 자기베어링 적용 고속스핀들 시제품의 사진을 나타내었다.



Fig. 10 Assembled thrust magnetic bearing

3.2 자기베어링 적용 스피들 회전실험

제작된 자기베어링이 적용된 고속 스피들에 대한 성능을 평가하기 위하여 Fig. 13과 같이 회전실험장치를 구성하였다. 고속 스피들 주변으로 모터를 구동하기 위한 모터인버터, 고주파유도모터를 냉각시키기 위해 냉각유를 순환시키기 위한 모터 냉각기, 자기베어링 제어기, 자기베어링 전류 공급을 위한 DC 파워서플라이 및 성능모니터링용 PC 등이 배치되어있다. 안전한 구동을 위해 회전체의 변위가 일정 수준 이상으로 증가하는 경우 자동으로 모터가 정지하도록 안전장치를 준비하였다. 또한, 갑작스런 정전으로 자기베어링이 동작하지 않아 발생할 수 있는 사고에 대비하기 위해 비상전원장치를 설치하였다. 회전체 끝단에 회전속도 측정기(RPM meter)를 부착하여 로터의 실제 회전속도를 측정하였다. 자기베어링 제어기는 10 kHz를 샘플링 주파수로 하는 PID 제어기, 노치필터(notch filter), 저역 통과 필터 (low pass filter) 등으로 구성되어있다^(1,9).



Fig. 11 Assembled spindle rotor



Fig. 12 Assembled high speed spindle with magnetic bearings

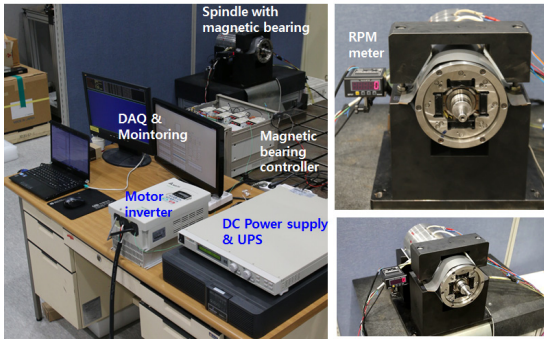


Fig. 13 Experimental setup for running test

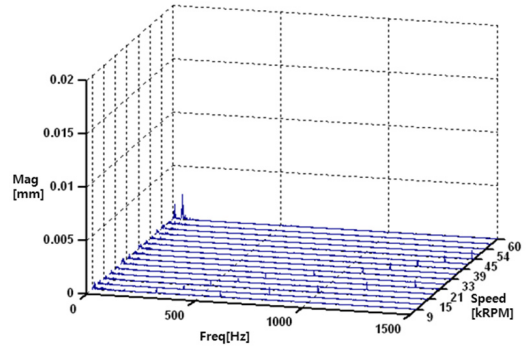


Fig. 16 Waterfall plot for axial vibration in thrust magnetic bearing

60 000 r/min까지 안정적으로 속도를 증가시킬 수 있었다. 60 000 r/min에서 전방 및 후방부 반경방향 불평형 응답(zero-to-peak)의 크기는 3 μm 이하의 양호한 진동 특성성을 보였다. Fig. 16에는 구동 속도에 대한 로터의 축방향 진동을 나타내는 waterfall plot을 나타내었는데, 전 속도 영역에서 눈에 띄는 진동성분 없이 안정적으로 지지되고 있음을 확인하였다.

4. 결 론

60 000 r/min급 고속스핀들에 적용하기 위한 자기 베어링을 설계하고, 자기베어링이 적용된 고속스핀들의 시작품을 완성하였다. 60 000 r/min까지의 회전 실험을 통하여 자기베어링의 안정적인 지지성능 및 양호한 불균형응답의 크기를 확인하였다. 향후 가공틀을 부착, 정밀 로터 밸런싱 등을 통하여 불균형응답의 크기를 더욱 개선하고, 실제 가공에 공작기계에 적용하여 가공성능을 평가할 예정이다.

References

- (1) Park, C. H., Choi, S. K. and Ham, S. Y., 2014, Design of Magnetic Bearing for Turbo Refrigerant Compressors, *Mechanics & Industry*, Vol. 15, No. 4, pp. 245-252.
- (2) Park, C. H., Kim, S. H. and Kim, K. S., 2013, Vacuum Chamber-free Centrifuge with Magnetic Bearings, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 84, No. 9, pp. 095106.

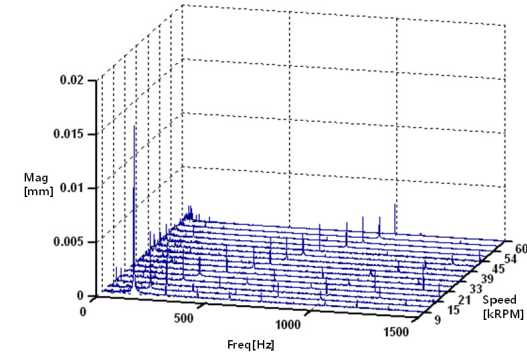


Fig. 14 Waterfall plot for radial vibration in front radial magnetic bearing

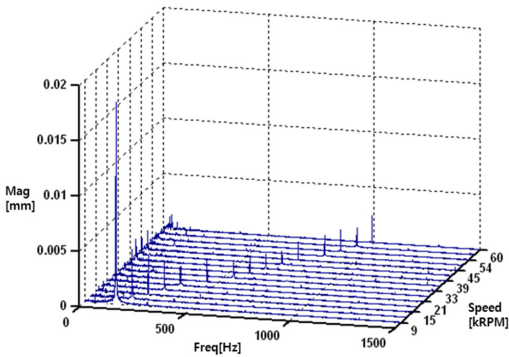


Fig. 15 Waterfall plot for radial vibration in rear radial magnetic bearing

구동시험은 60 000 r/min까지 수행하였으며 Figs. 14, 15에 구동 속도에 대한 전방 및 후방 반경방향 자기베어링 부분에서 로터의 반경방향 진동을 나타내는 waterfall plot을 나타내었다. 약 10 000 r/min에서 강제모드를 통과한 후 안정적인 진동을 보이며

(3) Wroblewski, A. C., 2011, Model Identification, Updating, and Validation of an Active Magnetic Bearing High-Speed Machining Spindle for Precision Machining Operation, Cleveland State University.

(4) Na, U. J., 2010, Analysis of an Electromagnetically Biased Combined Radial and Axial Magnetic Bearing, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 11, pp. 1038~1045.

(5) Park, C. H., Ham, S. Y., Kim, J. K., Hong, D. E. and Yoon, T. G., 2015, Design of 50,000 rpm High-frequency Spindle with Magnetic Bearings, KSPE Spring Conference, p. 808

(6) Yoon, T. G., Park, C. H., Hong, D. E., Ham, S. Y. and Kim, J. K., 2015, Study on Performance of 50,000 rpm Class High-frequency Spindle Applied Magnetic Bearing, KSPE Spring Conference, p. 806

(7) Park, C. H., Ham, S. Y., Hong, D. E. and Kim, J. K., 2015, Development of High Speed Spindle for Machine Tool with Magnetic Bearings, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 276~279.

(8) Park, C. H., Choi, S. K., Ahn, J. H., Ham, S. Y.

and Kim, S. H., 2013, Thrust Hybrid Magnetic Bearing using Axially Magnetized Ring Magnet, Journal of Magnetics, Vol. 18, No. 3, pp. 302~307.

(9) Park, C. H., Choi, S. K., Son, Y. S. and Han, Y. H., 2009, Development of 5 kWh Flywheel Energy Storage System Using MATLAB/xPC Target, Proceeding of the WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, Los Angeles, California, pp. 701~705.



Cheol Hoon Park worked at HDD division in Samsung Electronics from 2000 and joined KIMM at 2007. He is now a principal researcher in Department of Robotics & Mechatronics. His research interests are magnetic bearings, ultra-high speed rotor, precision control and artificial muscles.