

고속 스피indle용 공기 베어링의 열 특성에 관한 연구

이 득우(부산대 ERC/NSDM), 이 종렬, 김 보연, 안 지훈(부산대 대학원)

A Study on Thermal Characteristics of Air Bearing System for High-Speed Spindle

D. W. LEE(Pusan Univ.), J. R. LEE, B. H. KIM, J. H. AHN(Graduate School, Pusan Univ.)

ABSTRACT

The thermal characteristics of high-speed air spindle system with built-in motor are studied. Experiment and finite element method analysis obtain temperature rise and temperature distribution of housing. For the analysis, three-dimensional model is built and temperature rise and distribution in thermal steady state are computed for each rotational frequency. Generally, it is said that the heat generation of air bearing is negligible. But it is certain that the heat generation of air bearing can not be negligible especially in high-speed conditions. Frequency response test for air spindle system is executed. In case that the heat generation of air spindle system is high, natural frequency of the system becomes lower when it reaches thermal steady-state and it means that the stiffness of air bearing becomes smaller due to the change of bearing clearance. It is shown that the temperature rise of air spindle system causes thermal expansion and induces the variation of bearing clearance. In consequence the stiffness of air bearing becomes smaller.

Key words- Air Spindle(공기 주축), Air Bearing(공기 베어링), FEM analysis(유한요소 해석)

1. 서론

초경공구, 세라믹 공구, CBN공구, 다이아몬드 공구의 발달과 세라믹, 흑연 등의 신소재 가공 등 첨단 산업과 관련한 소재 공업의 고도화에 따라 고능률화와 고품위화에 대한 요구도 높아지고 있다. 이에 맞추어 공작기계의 고속, 고정도화에 관한 많은 연구가 수행되고 있다.

공작기계의 가공정밀도 및 가공능률에 결정적인 영향을 주는 요소는 대부분 주축 유니트 부분이며, 최근과 같이 고속, 고정밀과 유연성을 추구하는 공작기계에서의 주축 시스템이 수행되는 역할이란 매우 중요하다.

주축시스템에는 중속, 고풍력 주축시스템의 경우 볼베어링이 사용되고 있으나, 최근에 들어서 고속, 고정도 주축시스템을 구축하기 위해 공기 베어링을 주로 이용하고 있으며, 이에 관한 연구가 진행되고 있다.

유체 베어링에 있어서 1986년 M.Fillon, J.Frene

는 저어널과 베어링사이에서 발생하는 열 변형 계산치와 실험을 통하여 베어링과 저어널 사이의 간극과 편심율이 변화하고 있음을 제시하였다.¹¹⁾ Booser, E.R (1970) 및 Pinkus, O.(1990)는 베어링 표면이 열발생으로 인하여 소성변형이 발생함과 저어널 베어링 설계시 최소유막두께를 포함한 최대베어링 온도가 고려되어야 함을 제시하였다.¹²⁻⁵⁾ 1992년 M. K. Fitzgerald, 와 P. B. Neal는 베어링의 원주방향의 온도변화는 하중의 변화량에 따른 편심량과 속도의 증가에 따라 달라지는 것과 Peclet number와 베어링 길이와 직경의 비에 영향을 받음을 실험을 통해 밝혔다.¹⁷⁾ 모터내장형 공기 정압 스피indle은 다른 유체 베어링과는 달리 아주 적은 베어링 간극을 가지고 있으며, 충분한 냉각시스템을 구축하지 않을 경우 모터에서 발생하는 직접적인 열의 영향받게 되고, 따라서 베어링의 형상의 변화가 민감하게 발생할 수 있다.

본 연구에서는 주축계의 냉각 시스템과 베어링의 직경을 크기를 달리하여 열의 영향을 과다하게 받는

베어링(Easy Heating Bearing System : EHBS) 과 하우징 외부의 충분한 냉각순환방식을 도입함으로써 열에 의한 영향을 받지 않는 베어링(Hard Heating Bearing System : HHBS)의 두 가지 형의 베어링을 모델링 및 제작하여 실제 모터로부터 전열 되는 열의 거동을 시뮬레이션을 통한 분석과 실제 열에 의한 영향을 받은 베어링의 간극의 변화를 측정하기에는 어려움이 있기 때문에 주파수 분석 및 회전 정밀도의 변화를 측정함으로써 공기 정압 베어링의 열에 의한 영향을 분석함으로써 열적영향을 고려한 공기 정압 스피들 설계가 이루어져야 함을 확인해 보았다.

2. 주축계의 열 특성 실험

2.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 주축을 12,000rpm, 18,000rpm, 24,000rpm의 일정 속도로 공회전 시키면서 주축계 전반에 걸쳐서 정상상태에 도달할 때까지 각 부분별로 온도를 측정하여 비교· 분석하였다

Fig. 1에서는 EHBS 50,000rpm급의 주축의 조립도와 주축계에 설치된 열전대의 위치를 보여주고 있으며 Fig. 2에서는 HHBS 100,000rpm급의 모터내장형 공기 베어링 주축의 조립도를 보여주고 있다.

주축계의 하우징에는 (1)과 (2)로 표시된 2번 레디얼 베어링의 급기공과 급기공 사이에 해당하는 부분과 (3)으로 표시된 3번 레디얼 베어링의 급기공과 급기공 사이에 해당하는 부분에 열전대를 설치하였고 냉각채킷을 빠져 나오는 냉각수의 배출 라인 속에 열전대를 삽입하여 냉각수의 온도변화를 측정하였다.

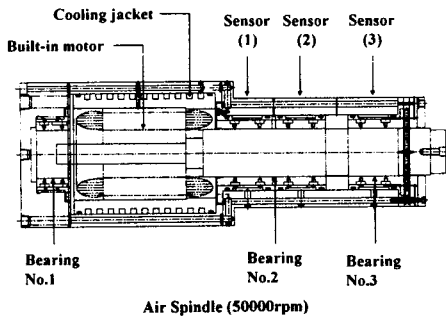


Fig. 1 Schematic diagram of air spindle (EHBS : 50,000rpm 급)

각 회전수에 대해 각각 120분 동안 주축을 공회전

시키면서 10분 간격으로 주축계에 설치된 열전대로부터 온도를 측정하였다.

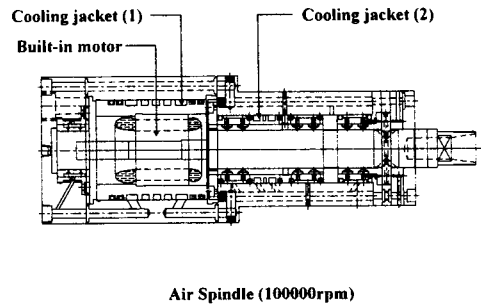


Fig. 2 Schematic diagram of air spindle (HHBS:100,000rpm 급)

2.2 실험결과 및 고찰

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에서는 각 회전수에 대한 주축계의 하우징의 온도 측정 결과를 보여주고 있다.

12,000rpm의 경우 주축계의 각 부분에서 거의 비슷한 온도 상승량을 보이면서 완만한 곡선을 이루고 있으며 18,000rpm에서는 전체적으로 10℃ 정도의 온도상승을 보여주고 있다. 24,000rpm에서는 정상상태에 도달했을 때 주축계의 하우징의 온도 상승량은 전

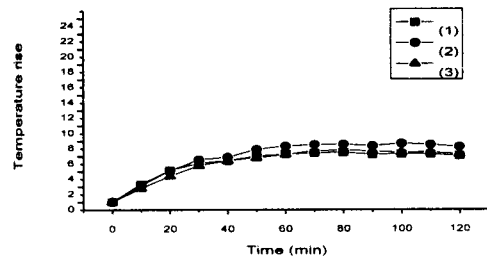


Fig. 3 Experimental result of temperature rise (12,000rpm)

체적으로 18℃~20℃ 정도이고 냉각채킷에 가까운 위치인 (1)부분에서는 회전수가 증가함에 따라 온도 상승량이 어느 정도 억제되고 있지만 (2)와(3)부분에서는 주위공기와의 대류에 의해서만 열이 방출되므로 (1)부분에 비해 더 높은 온도 상승량을 보여주고 있다.

각 회전수에 대하여 대략 30분이 경과하면서부터는 냉각수의 온도변화가 거의 없으며 회전수에 따라서 냉각수의 온도 상승량에는 큰 차이가 생기지 않고 대략 1°C~1.5°C 정도의 온도상승을 보여주고 있다.

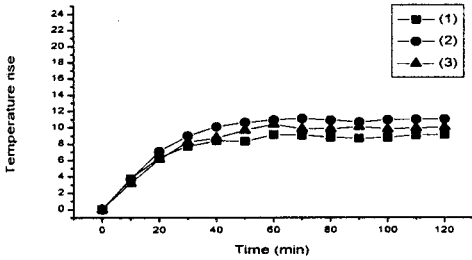


Fig. 4 Experimental result of temperature rise (18,000rpm)

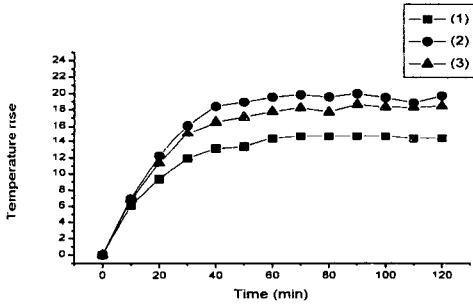


Fig. 5 Experimental result of temperature rise (24,000rpm)

3. 주축계의 유한요소 온도 해석

3.1 주축계의 모델링

주축계는 형상이 복잡하여 온도 분포변화에 대한 정확한 엄밀해를 구하는 것은 거의 불가능하므로 근사 해법을 이용한 수치해석 방법을 사용하여 이론적인 해석을 하고 있다. 본 연구에서는 유한 요소 법 (Finite Element Method)을 해석기법으로 하는 상용 해석프로그램인 ANSYS를 사용하여 모터내장형 공기 주축계에서의 열 특성과 온도분포 해석을 수행하였으며 발열원으로 모터의 스테이터만을 고려하였을 때와 공기베어링에서의 발열까지 고려하였을 때의 두 가지 조건을 서로 비교하였다.

3.2 해석 결과 및 고찰

먼저 공기베어링에서는 발열이 없고 단지 내장된 모터에서의 발열만이 존재한다는 조건으로 열전도 해석을 하였다. 모터에서의 발열만을 고려하여 해석한 24,000rpm의 회전속도에 대한 해석 결과를 보여주고 있으며 하우징에서 냉각재킷에 가까운 부분이 온도가 가장 낮게 나오는 실험결과와는 달리 모터에서 가장 먼 위치인 주축 선단 부분에서 온도가 가장 낮게 나왔다.

Fig.6은 모터에서의 발열조건과 공기베어링에서의 발열조건을 같이 고려하여 해석한 24,000rpm의 회전속도에 대한 해석 결과 하우징 표면에서 전체적으로 21°C~22°C 정도의 온도 상승을 보여주며 온도 측정 실험과 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

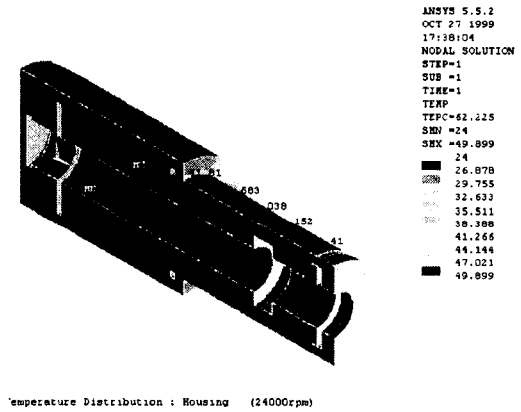
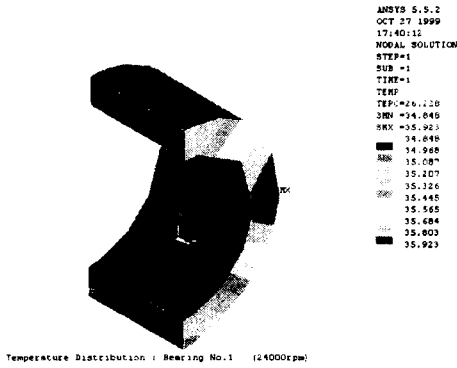


Fig.6 Temperature distribution in housing at 24,000 rpm

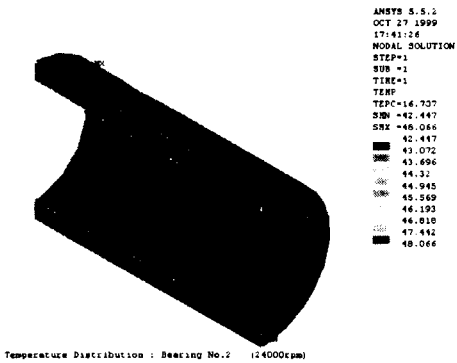
Fig. 7에서는 24,000rpm으로 공회전시 정상상태에 도달하였을 때의 레디얼 베어링 No.1, No.2, No.3에서의 온도분포를 보여주고 있다.

모터에서의 발열과 베어링 자체의 발열의 영향을 받아서 공기베어링 표면에서의 온도가 전체적으로 올라가며 온도상승으로 인해서 열변형이 일어날 수 있는 조건을 보여주고 있다.

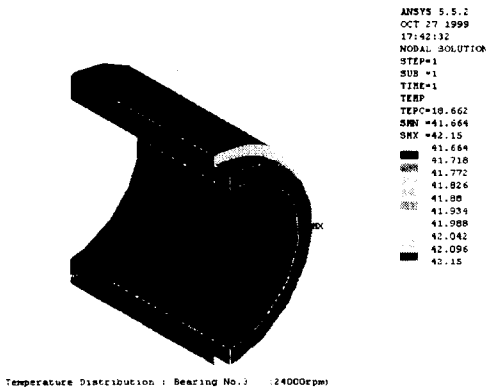
주축의 회전속도가 커짐에 따라서 공기베어링에서도 어느 정도 열이 발생할 수 있으며 FEM 해석 결과는 전체적으로 실험결과에 비해서 온도 상승량이 조금씩 높게 나오는 것은 실제 공기 주축계에서는 윤회체인 공기의 순환에 의해서 주축계 전반에 걸친 냉각 효과가 생기기 때문이라 생각된다.



(a) No.1 bearing



(b) No.2 Bearing



(c) No.3 bearing

Fig. 7 Temperature distribution in bearing at 24,000rpm

4. 주축계의 공기 베어링 특성 실험

4.1 실험장치 및 실험방법

공기베어링에서의 온도상승은 열변형을 유발하게 되고 이로 인해서 간극이 변하게 되기 때문에 베어링의 강성에 변화가 생기게 되어 공기 주축 자체의 성능에 영향을 줄 수 있다. 이를 확인하기 위해서 EHBS 50,000rpm급의 시제품과 HHBS 100,000rpm급의 완제품에 대해서 주파수 응답 특성 실험을 수행하였다. EHBS 50,000rpm급의 주축에 대해서 먼저 회전을 하기 전의 고유진동수를 측정하였 24,000rpm으로 60분 동안 공회전 시켜서 주축계가 열적 정상상태에 도달 하였을 때의 고유진동수를 다시 측정하여 주축계의 열변형에 의한 주파수 응답특성의 변화 및 회전 정밀도 변화를 비교·분석하였다. HHBS 100,000rpm급의 주축에 대해서도 같은 방법으로 실험을 하였으며 이때 주축의 공회전 속도는 30,000rpm, 운전시간은 60분이었다.

4.2 실험 결과 및 고찰

Fig. 8과 Fig. 9에서는 EHBS 50,000rpm급의 공기베어링 주축계에 대한 운전 전의 주파수 응답특성과 24,000rpm으로 60분간 공회전 시킨 후의 주파수 응답특성을 보여주고 있다. EHBS 50,000rpm급의 주축의 경우 운전전의 1차 고유진동수는 112Hz였으며 60분간 공회전 시킨 후 다시 측정한 1차 고유진동수는 104Hz 로 이보다 낮게 나왔고 주축계의 2차, 3차, 4차 고유진동수 역시 운전 전에 비해서 큰 폭으로 낮아지는 경향을 볼 수 있었다. 따라서 주축계 전반에 걸친 온도상승으로 인해 공기베어링이 열팽창을 일

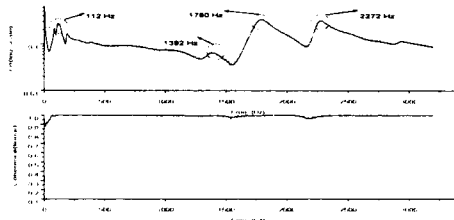


Fig. 8 Frequency response and coherence

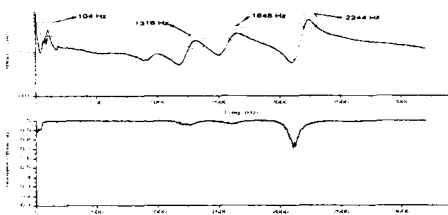


Fig. 9 Frequency response and coherence (after running)

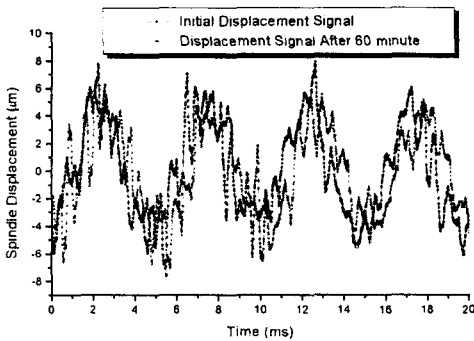


Fig. 10 Spindle Displacement Signal

서 베어링 간극의 변형현상으로 인해서 주축계의 강성이 낮아지게 됨을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 10에서는 분해능 2.5nm인 용량형 변위센서를 이용하여 0.002ms 샘플링 시간으로 신호를 획득함으로써 스피indle 샤프트의 회전 정밀도를 측정하였는데, 실험결과 열의 영향을 받은 경우 샤프트의 회전 정밀도의 변의 진폭값이 증가함과 동시에 신호의 표준편차량이 10% 증가함을 알 수 있었으며 재현성을 확인하였다.

Fig. 11와 Fig. 12에서는 HHBS 100,000rpm급의 주축에 대한 실험결과를 보여주고 있다.

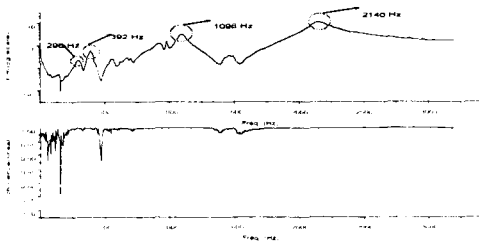


Fig. 11 Frequency response and coherence

HHBS 100,000rpm급의 주축에 경우 회전에 의한 주축계의 온도상승은 거의 없었으며 실험결과 1차 고유진동수와 2차 고유진동수는 변화가 없었고, 3차 고유진동수와 4차 고유진동수는 각각 8Hz, 12Hz 정도의 작은 폭으로 낮아지는 것을 알 수 있었다.

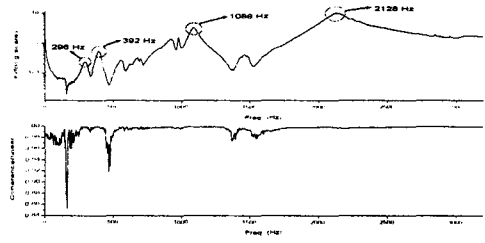


Fig. 12 Frequency response and coherence (after running)

주과수 응답특성 실험을 통하여 주축에서의 온도 상승량이 높았을 때는 간극의 변화량이 커져서 강성의 저하로 인해 고유진동수가 큰 폭으로 작아지며 온도 상승량이 거의 없었을 때는 간극의 변화나 강성의 저하가 거의 생기지 않아 고유진동수의 변화량은 아주 작은 값을 가진다는 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 모터내장형 공기베어링 주축의 열 특성에 관한 실험과 이론해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주축의 회전에 따라서 주축계 전반에 걸쳐서 온도상승이 발생하며 약 60분이 지나면서 정상상태에 도달하였다.
- 2) 냉각재킷은 냉각작용이 영향을 줄 수 있는 범위가 한정적이므로 주축계 전반에 걸쳐서 열이 발생할 경우에는 하우징에 별도의 냉각재킷이 더 필요함을 알 수 있었다.
- 3) 유한 요소 법을 사용하여 모터내장형 공기베어링 주축에 대한 3차원 모델링과 해석을 수행하였으며 실험결과에 가까운 해석결과를 얻을 수 있었다.
- 4) 공기베어링에서의 발열을 고려하였을 때 보다 실제에 가까운 해석결과를 얻을 수 있었으며 축의 고속회전에 따라서 공기베어링에서도 발열이 생김을 알 수 있었다.

5) 주파수 응답 특성을 분석하여 모터내장형 공기베어링 주축계의 온도상승이 열팽창을 일으켜 베어링 간극을 변화시켜서 공기베어링의 강성을 낮아지게 함을 확인하였다.

Bearings " Transaction of ASME, Vol. 114, January 1992, pp 122-130.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구 센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Analysis of Thermal Effects in Hydrodynamic Bearings, M.Fillon, J.Frene ASME Journal of Tribology, April 1986, Vol.108 219-224
2. Rohde, S.M., Kong Ping, O. H., "A Thermoelastohydrodynamic Analysis of A Finite Slider Bearing," General Motors Corporation, Internal Report, 1973
3. Hufenus, P.P., and Khaletzky, D., " Theoretical Study of Heat Transfer in Thrust Bearings of Hydraulic Machines. Application to the Cooling of the Oil Film," Proceeding of the 6th Leeds-Lyon
4. Symposium on Tribology, Thermal Effects in Tribology, Published by Mech. Eng. Publ Ltd, 1980, pp117-126
5. Boncompain, R., " Les Paliers lisses en regime thermogydrodynamique, Aspects theoriques et experimentaux, " These de Doctorat d'Etat, Universite de Poitiers, 1984
6. Booser, E.R., Ryan, R.D., and Linginhoker, C.L., 1970, " Maximum Temperature for Hydrodynamic Bearings under Steady Load," Lubrication Engineering Vol. 26, pp 226-235.
7. Pinkus, O., 1990, " Thermal Aspect of Fluid-Film Tribology, ASME Press, N.Y.
8. Pinkus, O., and Bupara, S., 1979, "Adiabatic Solution of Finite Journal Bearings," ASME Journal of Lubrication Technology pp.492-496.
9. M. K. Fitzgerald, P. B. Neal " Temperature Distributions and Heat Transfer in Journal