공기정압/능동자기 복합 베어링을 이용한 로터 궤적 변화에 대한 연구

The study on the orbit change of rotor using active hybrid bearings

*김종혁 [1], #박인황 [2], 김기환 [3], 박정훈 [1]

*J. H. Kim[1], #I. H. Park(zeus0304@gmail.com)[2], K. H. Kim[3], J. H. Park[1]

[1] 현대위아주식회사 연구소, [2]㈜케이엠비앤센서, [3] 현대자동차 중앙연구소

Key words : Active hybrid bearing, Aerostatic bearing, Active magnetic bearing, Rotor, Orbit

1. 서론

최근의 IT 혁명에 의해서 수요가 급증하고 있는 사출성형용 정밀 금형의 분야에 있어서는, 가격 절감과 납기 단축이 최대의 과제이다. 이러한 과제에 대응하기 위해서, 종래의 방전가공에 의한 방법으로부터 절삭가공에의 전환이 진행되고 있으며, 절삭 가공 중 고속 가공은 가공의 고능률화, 고정밀화를 위한 주요 기술이다. 고속 절삭의 성능을 좌우하는 핵심요소로서는 주축용 베어링을 들 수 있다.

고속 회전을 가능하게 하는 주축용 베어링으로는 구름베어링, 오일 베어링, 공기 베어링, 그리고 자기베어링이 사용되고 있으며, 최근에는 보수가 용이하고 장시간 가동에 견딜 수 있는 등의 이유에 의해 공기베어링, 자기베어링과 같은 비접촉 베어링 스핀들이 주목 받고 있다.

고속 정밀 주축은 불안정성이 나타나지 않는 영역에서 사용되는 것이 보통이다. 하지만, 위험속도에서 공기정압베어링의 경우 낮은 감쇠 특성으로 인하여 시스템이 불안정해지는 경우가 발생한다. 공기정압베어링은 주축의 편심량에 따라 강성과 감쇠가 변한다[1][2]. 이는 다시 말해, 회전시 주축의 위치를 변화시키면 주축계 시스템의 특성을 변화 시킬 수 있으며, 이는 위험속도에서의 불안정성을 제어할 수 있는 가능성이 있다고 할 수 있다.

본 논문에서는 공기정압베어링(Aerostatic Bearing)과 능동자기베어링(Active Magnetic Bearing; AMB)의 복합화를 도모한 능동복합베어링(Active Hybrid Bearing; AHB)을 개발하였으며, 이를 이용하여 주축 위치에 따른 로터의 궤적 변화에 관한 연구를 수행함으로써 위험속도에서의 불안정성 제어 가능성을 확인하였다.

2. 주축용 베어링

고속 절삭의 경우 적당한 절삭 속도를 얻기 위해서는 매분 수만 회전 이상의 고속 스핀들이 필요하다. 고속 스핀들에 이용되는 베어링으로서는 구름베어링, 오일베어링, 공기베어링, 그리고 자기베어링이 사용되고 있으며, 각 베어링의 장단점을 표 1 에 기술하였다.

구름베어링은 정강성, 동강성이 모두 높고 구조가 간단하면서도 가격이 저렴한 등의 장점이 있다. 그러나, 고속회전중의 마찰 손실과 열변형에 의한 정밀도 저하, 미소진동 및 보수관리 등의 문제가 발생한다. 오일베어링은 강성과 감쇠에 대한 장점뿐만 아니라, 하중지지용량 또한 우수한 베어링이다. 하지만, 윤활유의 유출에 의한 오염의 위험이 있고, 공기베어링에 비해 발열이 커서 고속화에 한계가 있다. 공기정압베어링은 주축을 비접촉으로 지지하기 때문에 회전중의 마찰 저항이 매우 적으며 발열도 작기 때문에 고속 회전이 가능하다. 윤활유를 사용하지 않기 때문에, 작업 환경을 오염시키지 않는다. 또한 평균화 효과에 의해 회전 정도가 매우 높고 동적 안정성이 높은 장점을 가지고 있다. 그러나, 압축성 유체로 지지하고 있기 때문에 정강성과 부하용량이 작으며 고속 회전시 불안정성을 보이는 단점을 가지고 있다. 능동자기베어링은 축의 변위를 센서와 전자석을 통하여 전기적으로 제어하므로 항상 모니터링이 가능하다는 장점과 베어링의 강성과 감쇠를 능동적으로 조절함으로써 주축계의 동특성을 시스템의 특성에 맞도록 최적화 시킬 수 있는 장점을 가진다. 따라서 위험 속도에서 제어 알고리즘의 개선을 통하여 주축계의 진동 특성을 향상 시킬 수 있다.

본 논문에서는 공기정압베어링과 능동자기베어링의 장점, 즉 공기정압베어링의 동적 안정성과 높은 회전 정도, 그리고 능동자기베어링의 높은 정강성과 감쇠, 그리고 진동 특성 향상을 이용하였다.

3. 시험장치

주축의 편심량에 따른 로터 궤적 변화를 대한 연구를 수행하기 위해 그림 1 과 같은 시험 장치를 제작하였다.

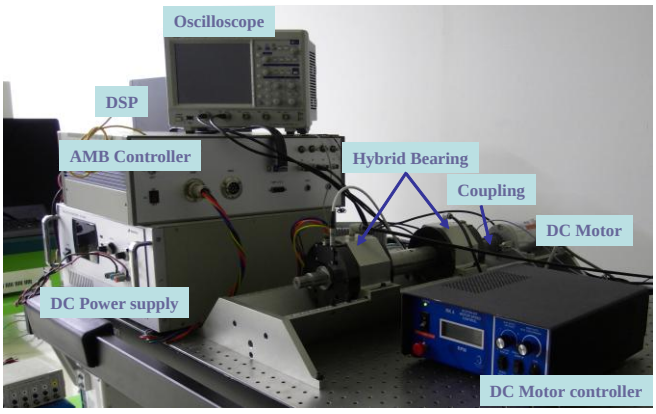

Fig. 1 Test rig of hybrid bearing system

Table 1 Comparison of spindle bearings [3]

Characteristics	Rolling element	Hydrodynamic	Hydrostatic	Aerodynamic	Aerostatic	Magnetic
Cost	Low	Med.	High	Low/Med.	Med./High	Very high
Maintenance	Low	Med.	Med./High	Low/Med.	Low/Med.	Low
Damping	Low/Med.	High	Very high	Med.	Low	Med./High
Stiffness	Med./High	High	Very high	Low/Med.	Low/Med.	Med./High
Load capacity	Med./High	Med./High	High	Low	Low	Med./High
Running accuracy	Med./High	High	High	High	Very high	High
Speed range	Med.	Low	Med./High	High	High	Very high
Power loss	Low	High	High	Med.	Med.	Very low
Reliability	Med./High	High	High	Med./High	Med./High	Med./High

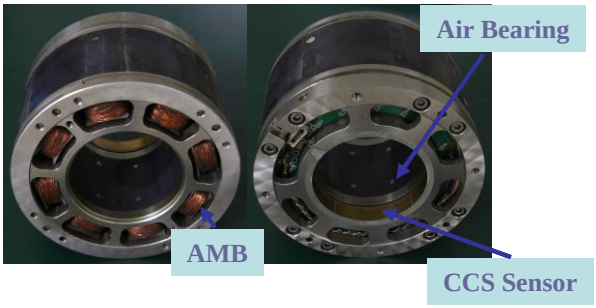

Fig. 2 Active Hybrid bearing

시험장치는 크게 능동복합베어링, 위치제어기(DSP), 자기베어링 컨트롤러, 그리고 모터 시스템으로 구성된다. 위치제어기는 자기베어링의 로터 위치를 제어하기 위해 M67 DSP (II. Inc.)를 사용하였다. 자기베어링 컨트롤러는 위치제어기의 위치 제어 명령 신호를 전류 신호로 바꿔주고 이를 자기베어링 코일에 가한다. 전류 앰프로는 4212Z (Copley Inc.)을 사용하였다.

능동복합베어링의 공기정압베어링은 강성은 비교적 작지만 자려진동(hammering)이 없어 안정적인 운전이 가능한 오리피스-자성형을 채택하였으며, 지름 0.2 mm 노즐을 8 개씩 2 열로 배치하였다. 공기정압베어링의 직경은 40 mm, 폭은 40 mm 이며, 공기정압베어링의 강성이 자기베어링의 강성과 같은 수준이 되도록 하기 위하여 공칭 간극을 18 μm 으로 설계하였다[4][5][6]. 자기베어링은 비접촉 변위 센서로 원통형 정전용량 변위센서(Cylindrical Capacitive Sensor; CCS)를 사용하였으며, 코일의 지름은 0.8mm, 턴수는 150 턴을 감아, 최대 하중 지지용량을 200N 으로 설계하였다. 또한 베어링 내면을 비자성체 세라믹으로 코팅하여 공기베어링에 대한 간극은 18 μm 을 유지하면서 자기베어링 간극이 0.3 mm 가 되도록 하였다. 그림 2 에 능동복합베어링 시스템을 도시하였다.

3. 시험 결과

본 논문에서는 공기정압베어링에 대한 자기베어링의 제어 가능성을 검증하기 위한 시험과 주축의 편심 위치 변화에 따른 로터의 회전 궤적 변화에 대한 시험을 수행하였다.

공기정압베어링에 대한 자기베어링의 제어 가능성 및 영향을 검증하고자 공기정압베어링 단독 지지(자기베어링 OFF), 자기베어링 지지(공기베어링 OFF), 그리고 능동복합베어링(공기베어링 ON, 자기베어링 ON)을 이용하여 주축을 부상시킨 후 각각의 경우에 대해 회전 시험을 수행하였으며, 1500 rpm 에서의 회전 궤적을 그림 3 에 도시하였다.

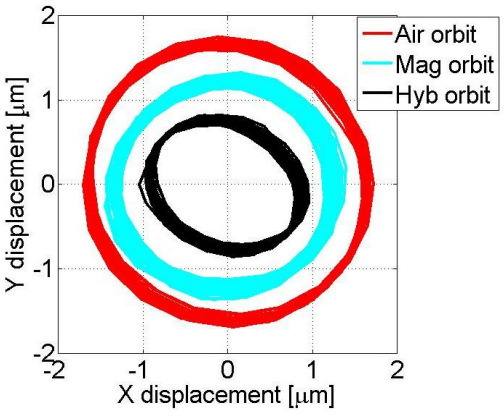

Fig. 3 Orbit comparison with various bearings

그림 3 에서 알 수 있듯이, 능동복합베어링의 궤적이 가장 작은 것을 알 수 있으며, 공기정압베어링의 특성을 자기베어링이 조절할 수 있는 가능성을 확인하였다.

주축의 편심 위치 변화에 따른 로터의 회전 궤적 변화를 검증하고자 자기베어링을 이용하여 주축의 위치를 변화시켜 가면서 로터의 궤적 변화에 대한 시험을 수행하였으며, 이를 그림 4 에 도시하였다. 시험 방법은 1500 rpm 에서 하이브리드 베어링으로 주축을 부상시킨후, 자기베어링을 이용하여 주축의 위치를 변화 시켰다.

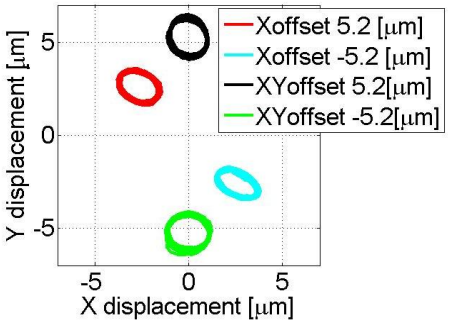

Fig. 4 Orbit comparison with various rotor position

그림 4 에서 알 수 있듯이, 주축의 편심 위치 변화에 따라 로터의 회전 궤적이 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 다시 말해 자기베어링을 이용하여 주축의 편심 위치를 변화시킴으로써 능동복합베어링 시스템의 강성과 감쇠계수와 같은 동특성을 변화 시킬 수 있다는 것을 검증하였다. 이 시험을 통하여 위험속도에서의 주축의 진동 특성을 향상시킬 수 있는 가능성을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 공기정압베어링과 자기베어링을 결합한 새로운 형태의 능동복합베어링을 개발하였으며, 회전 시험을 통해 능동복합베어링의 적용 가능성을 검증하였으며, 로터의 회전 궤적 변화 및 위험 속도에서의 진동 특성 향상에 관한 가능성을 확인하였다.

고속 회전 시 정밀도 유지 및 안정성 확보를 위해 최적의 주축 편심 위치 및 제어 파라미터를 선정함으로써, 초정밀 고속 주축용 베어링으로 능동복합베어링이 적합함을 확인하였다.

참고문헌

1. 박상신, “초정밀 공작기계용 공기베어링의 해석 및 진동특성 측정에 관한 연구”, 서울대학교 박사학위논문, 1995.
2. Han, D.-C., Park, S.-S., Kim, W.-J., and Kim, J.-W., “A study on the characteristics of externally pressurized air bearings”, Precision Engineering, **16**, 164-173, 1994.
3. David A. Stephenson and John S. Agapiou, “Metal Cutting Theory and Practice”, CRC Press, 2006.
4. Yang, D.-W., Chen, C.-H., Kang, Y., Hwang, R.-M., and Shyr, S.-S., “Influence of orifice on stability of rotor-aerostatic bearing system”, Tribology International, **42**, 1206-1219, 2009.
5. Lo, C.-Y., Wang, C.-C., and Lee, Y.-H., “Performance analysis of high-speed spindle aerostatic bearings”, Tribology International, **38**, 5-14, 2005.
6. Stout, K.J., Barrans, S.M., “The design of aerostatic bearings for application to nanometer resolution manufacturing machine system”, Tribology International, **33**, 803-809, 2000.