공기포일 및 자기 하이브리드 베어링으로 지지되는 고속 축의 진동 제어 모의 시험

A Vibration Control Simulation of High Speed Rotating Shaft Supported by a Hybrid Air foil-Magnetic Bearings

*박정호[1], #안형준[2], 김승종[3], 이용복[3],
* J. H. Park[1], #H. J. Ahn[2](ahj123@ssu.ac.kr), S. J. Kim[3], Y. B. Lee[3],
[1]숭실대학교 대학원, [2] 숭실대학교 기계공학과, [3]한국과학기술연구원,

Key words : Air-foil Bearing , Magnetic Bearing , Hybrid Bearing , Vibration Control

1. 서론

공기포일 베어링은 윤활제가 필요 없고 에너지 손실 및 진동이 매우 작기 때문에 고속운전이 가능하여 이를 이용한 터보기기의 시장이 급격히 증가하고 있다 [1]. 그러나 공기포일 베어링은 구동 초기 마찰/마모가 크게 발생하고, 감쇠가 적어 구동 중 외란의 영향을 받기 쉽기 때문에 이를 보완하기 위해 초기 구동 시 축을 부상시키고 운전 중 적절한 감쇠 능력을 부여할 수 있는 자기 베어링을 조합하여 적용하면 고속 회전기의 운전 특성을 개선할 수 있다 [2, 3].

본 연구에서는 공기포일 및 자기 하이브리드 베어링으로 지지되는 고속 축의 진동 제어 모의실험에 관한 것이다. 불평형 질량 모의 실험을 통해 공기 포일 베어링만으로 지지했을 때와 하이브리드 베어링을 지지될 때의 회전 궤적에 따른 동역학적 성능을 비교한다 [4]. 또한 자기 베어링을 추가하여 회전축 변위에 따른 전류에 대해 PD 제어를 수행하였을 경우에 대한 회전 궤적 변화를 통하여 공기포일 베어링만으로 지지했을 때보다 높은 안정성과 넓은 작동영역을 가질 수 있음을 보인다 [3].

2. 공기포일 베어링으로 지지되는 고속축의 특성

본 연구의 대상인 가스포일 및 전자기 하이브리드 베어링으로 지지되는 고속회전체를 Fig. 1 에 나타내었다. 가운데 BLDC (Brushless DC) 모터를 중심으로 공기포일 및 전자기 하이브리드 베어링이 설치되어 있다. 공기포일 베어링이 가지는 고속회전의 장점과 자기 베어링이 가지는 저속회전에서의 장점을 결합한 하이브리드 베어링은 공기포일 베어링의 높은 정적 강성과 자기 베어링의 제어 용이성 때문에 단독으로 구동하는 것보다 더 높은 하중 용량을 견딜 수 있는 특징을 가지게 된다 [2].

우선 Fig. 1 의 공기포일 베어링으로 지지되는 고속 회전체에 관한 윤활 해석을 통하여 편심율, 자세각을 얻었고 동적 해석을 통하여 평형위치에서의 강성과 감쇠값을 얻었다 [3]. 해석 대상 회전 축의 전체 무게는 4.078kg 이고 길이는 453mm 이며 베어링의 대략적인 형상 값은 직경이 35mm, 길이는 45mm, 틈새는 0.05mm 이다.

강체 회전체 동역학 모델에 해석된 공기포일 베어링의 강성과 감쇠를 추가한 후 공기포일 베어링으로 지지되는 강체 회전축 시스템의 위험 속도 선도와 감쇠비의 변화를 해석하여 Fig. 2 에 나타내었다. 회전축의 휨 모드는 30,000rpm 이후에 발생하므로 우선 고려 대상에서 제외한다. 위험 속도 해석 결과에 따르면 병진 강체 모드가 5,000rpm 이하의 저속에서 발생하며 만약 공기 동압이 완벽하게 형성되지 않은 상태에서 공진이 발생하게 된다면 베어링이 손상을 입을 가능성이 있다. 또한 감쇠비는 회전속도가 증가함에 따라 감소하고 고속 운전시에 외란에 취약한 특성을 지닌다.

하이브리드 베어링으로 지지되는 경우 공기포일 베어링과 자기 베어링이 하중을 분산하여 지지한다. 지지하중 변화에 따른 공기포일 베어링만으로 지지되는 축의 감쇠비와 회전 궤적 변화를 Fig. 3 에 나타내었다. 공기포일 베어링으로 지지되는 하중이 50% 이하로 감소하면 감쇠비가 음으로 변해 결국 불안정해 진다. 따라서 하이브리드 베어링을 통해 지지할 경우 자기베어링이 지지하는 하중이 과도하게 커지면 안정성에 악영향을 줄 수 있다. 따라서 공기 포일 베어링의 저속에서의 불안정성과 하중 영향을 고려하여 공기포일 베어링의 성능을 보완할 수 있는 자기 베어링의 제어가 필요하다.

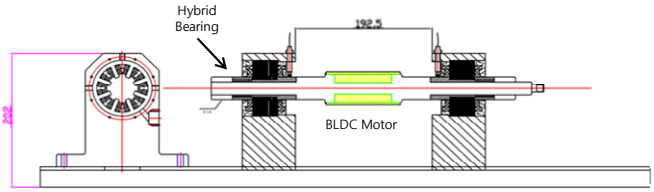
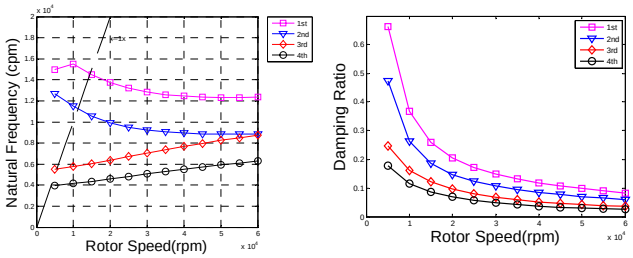
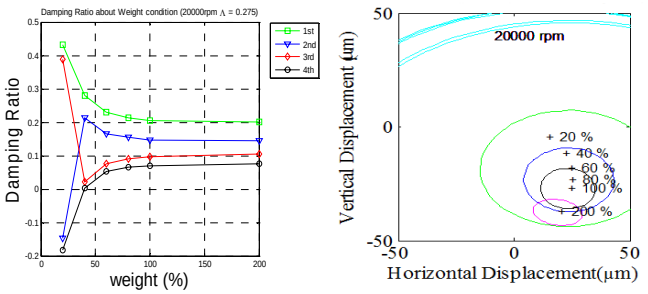


Fig.1 Sketch of experimental apparatus



(a) Critical speed map (b) Damping ratio

Fig.2 Critical speed map and damping ratio of the air-foil rotor system



(a) Damping Ratio (b) Rotor orbit

Fig.3 Damping ratio and rotor orbit of the air-foil rotor system (20,000 rpm)

3. 자기 베어링을 추가한 하이브리드 베어링 특성

간단한 일자유도계 자기베어링 시스템에서 전자기력은 작동점 근처에서 식 (1)과 (2)와 같이 선형화 될 수 있다.

$$F = k_i \cdot i_c + k_x \cdot x \qquad (1)$$

$$k_i = \frac{\mu_0 N^2 A}{g^2} i_b \,,\; k_x = \frac{\mu_0 N^2 A}{g^3} i_b^2 \qquad (2)$$

여기서 x는 대상체의 변위, i_c는 입력 제어 전류 μ_0는 진공 상태에서의 투자율, N는 권선 수, A는 자기베어링 극 면적, g는 베어링과 대상체의 공극, i_b 는 바이어스 전류를 의미한다. 모의 시험에서의 공극은 0.7mm, 극면적은 210mm^2, 바이어스 전류는 1.5A이다.

하이브리드 베어링은 식 (1)의 전자기력의 적절한 제어를 통하여 공기포일 베어링만으로 지지되는 회전축의 안정성을 향상시킬 수 있다. 자기 베어링을 추가한 하이브리드 베어링으로 지지되는 축의 성능 향상을 검증하기 위하여 불평형 질량 모의 시험을 수행하였다. 불평형 질량에 의한 입력은 조화가진 형태로 주어지며 불평형 질량에 의한 가진은 식 (3)과 같다.

$$\text{x dir.: } m_0 r_e \Omega^2 \cos\Omega t \,, \quad \text{y dir.: } m_0 r_e \Omega^2 \sin\Omega t \qquad (3)$$

여기서 m_0 는 불평형 질량, r_e 는 불평형 질량 위치이고, 모의시험을 위한 불평형 질량 크기는 0.24g 이고, 불평형 질량이 위치한 거리는 0.062mm 이다.

불평형 질량에 회전 궤적 변화를 보기 위한 모의 시험 모델은 MATLAB 의 Simulink 로 구성하였고 시스템을 Fig. 3 에 나타내었다. 공기포일 베어링만으로 지지되는 시스템은 상태공간 모델로 나타내고 그 동적 변위와 편심을 궤환하여 자기베어링의 전자기력을 제어하는 시스템이다.

공기베어링만으로 지지되는 경우와 하이브리드 베어링으로 지지되는 경우에 대한 불평형 질량 모의시험 결과를 Fig. 4 와 5 에 나타내었다. Fig. 4 와 같이 공기포일 베어링만으로 지지는 경우 공진으로 인하여 저속에서 베어링 틈새 한계인 0.05mm 를 초과한다. 하지만 Fig.5 에서 볼 수 있듯이 간단한 PD 제어기를 통하여 제어된 하이브리드베어링의 경우 공기포일 베어링만으로 지지하는 것보다 안정성이 크게 향상 되었다.

4. 결론

공기포일 및 자기 하이브리드 베어링으로 지지되는 고속축의 진동제어 모의 시험을 통해 저속 부상 안정성이 향상됨을 보였다. 공기포일 베어링만으로 지지되는 축에 경우 5,000rpm 에서 강체 모드 공진의 영향으로 응답이 베어링 틈새 0.05mm 를 넘어 마찰이나 마모가 심하게 발생할 것으로 예상된다. 반면, 하이브리드 베어링에 PD 제어를 수행한 결과 부상 안정성이 크게 향상되었다. 자기 베어링의 적절한 하중지지 범위에서 전자기력에 대한 제어를 통해 높은 안정성과 넓은 운전 영역을 갖는 하이브리드 베어링의 설계가 가능하다.

후기

본 연구는 한국과학기술연구원의 고속 회전기의 지능형 센서 및 액추에이터 기술 개발 과제의 지원으로 연구되었습니다.

.

참고문헌

1. Heshmat, H., Chen, M. H., Walton, J. F., "On the Performance of Hybrid Foil-Magnetic Bearings", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 122, 73-81, 2000

2. Swanson, E., Heshmat, H., Walton, J. F, "Performance of a Foil-Magnetic Hybrid Bearing", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 124, 375-382, 2002

3. Kim, C. H., LEE, Y. B., Park, D. J., Ryu, K., “Rotordynamic characteristics of a micro turbo generator supported by air foil bearings”, Journal of micromechanics and microengineering, 297-303, 2007

4. Ahn, H. J., "A Study on System Identification and Vibration Control of the AMB Spindle for High Speed Precision Machining using Cylindrical Capacitive Sensors", Ph.D. Thesis, Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, 2001.

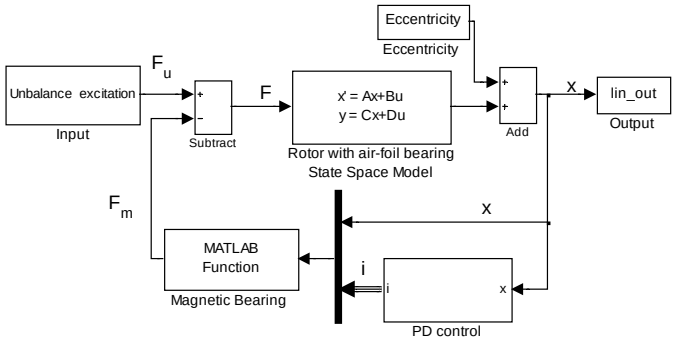
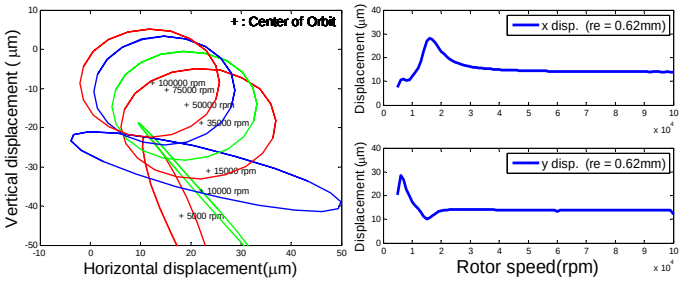
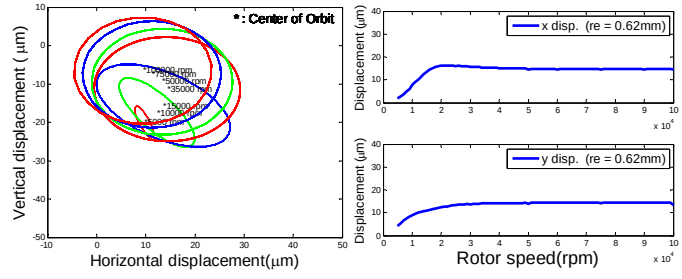


Fig.4 Simulation model for PD control hybrid system



(a) Rotor orbit (b) Frequency response

Fig.5 Rotor orbits and Frequency response of air-foil bearing



(a) Rotor orbit (b) Frequency response

Fig.6 Rotor orbit and Frequency response of air-foil magnetic hybrid bearing