

자기베어링으로 지지되는 연성축계의 식별 및 강인 제어에 관한 연구

안형준*, 전수(서울대 대학원 기계항공공학부), 한동철 (서울대 기계항공공학부)

A Study on the Identification and Robust Control of Flexible Rotor Supported by Magnetic Bearing

H. J. Ahn, S. Jeon(Graduate student, School of Aero. & Mech., SNU), and D. C. Han(School of Aero. & Mech., SNU)

ABSTRACT

The magnetic bearing systems are intrinsically unstable, and need the feedback control of electromagnetic forces with measured displacements. So the controller design plays an important role in constructing high performance magnetic bearing system. In case of magnetic bearing systems, the order of identified model is high because of unknown dynamics included in closed loop systems - such as sensor dynamics, actuator dynamics - and non-linearity of magnetic bearings itself. In this paper the identification and robust control of flexible rotor supported by magnetic bearing are discussed. We measure and identify overall system that contains not only flexible rotor model but also magnetic bearing and time delay. The structured and unstructured uncertainties are modeled that cover variations of natural frequencies, uncertainties in sensor and actuator gains and unmodeled dynamics. And desired performances are specified with several weighting functions. Using augmented system that includes identified model, uncertainties, and weighting functions, μ -synthesis is applied to flexible rotor supported with magnetic bearing. The flexible rotor was spin up over the first flexible critical speed.

Key Words : Flexible rotor (연성축), Magnetic bearing (자기베어링), Identification (식별), Uncertainty (불확정성), Robust control (강인제어), μ -synthesis (뮤 제어기법)

1. 서론

자기베어링 시스템은 물리적인 접촉 없이 전자석 작동기에 의한 전자기력으로 대상체를 지지하므로 윤활 시스템이 필요하지 않고, 거의 모든 비자성 유체 내에서 사용이 가능하며, 고속 회전이 가능하다는 등의 다양한 장점들을 지니고 있다. 자기베어링은 기본적으로 대상체의 안정한 부상을 위해서 되먹임 제어가 필요하고, 적용된 제어기에 의하여 자기베어링의 주요 특성들이 결정된다. 그러므로 고성능 자기베어링 시스템의 설계에 있어, 적절한 제어기의 선정이 매우 중요한 역할을 한다.

자기베어링 시스템은 좋은 성능을 얻기 위해 정확한 시스템의 모델이 필요하다 따라서, 정확한 모델을 얻기 위한 시스템 식별이 필수적이라고 할 수

있다. 하지만 자기베어링 시스템은 개루프에서 불안정하고 강체 모드(rigid mode) 극점과 연성 모드(flexible mode) 극점을 동시에 가지고 있어서 일반적인 시스템 식별 방법을 적용하기가 어렵다. Gahler 등[1]은 연성 축 자기베어링 시스템의 강체 모드 극점을 식별하기 위해 주파수 응답 행렬의 절대값을 이용하고 가상의 비례 강성을 도입하였다. 이 방법은 직접 주파수 응답함수를 이용한 식별에 비해 정확성이 떨어진다.

뮤(μ) 제어를 비롯한 강인 제어는 기존의 PID 제어기에 비해 자기베어링 시스템에서 그 가능성이 매우 크다. 따라서, Fitro 등[2]은 자기베어링 공작기계 주축에 적용하였고 Losch 등[3]은 대용량 2MW 펌프에 적용하였으며 Schonhoff 등[4]은 휠라이휠 축에 적용하였다. 그러나 각각 자기베어링 요소를 식

별하고 그것에 대한 불확정성을 모델링한 후 이에 대해 유 설계기법을 적용하였다. 따라서, 전체 시스템에 대한 식별이 없기 때문에 공칭 모델에 대한 정확도가 떨어지고 과도한 설계의 우려가 있다.

본 논문에서는 연성 축, 자기베어링, 그리고 시간 지연까지 포함한 전체 시스템에 대한 주파수 응답을 측정한다. 측정된 주파수 응답을 이용하여 전체 시스템을 비선형 모달 식별 기법을 이용하여 식별한다 식별된 공칭 모델에 불확정성과 성능 가중 함수를 통합하고 혼합 불확정성을 고려하여 유 제어기법을 적용한다 설계된 제어기는 직접 적용하기에 차수가 매우 높으므로 페루프 성능을 고려하여 차수를 낮춘다. 차수가 낮아진 제어기를 실제 자기 베어링 연성 축에 적용한 결과 일차 연성 공진 이상까지 안정한 운전이 가능하였다

2. 자기베어링 연성 축 시스템

2.1 자기베어링

자기베어링의 작동점 근방에서의 자기력 방정식은 다음과 같이 선형화하여 나타낼 수 있다.

$$F = k_1 z + k_2 i \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{\mu_0 N_c^2 A}{g_0^2} i_b, \quad k_2 = \frac{\mu_0 N_c^2 A}{g_0^3} i_b^2 \quad (2)$$

이때, z 는 변위, i 는 전류, μ_0 는 진공에서의 투자율, N_c 는 코일 턴수, A 는 작동기 코어의 면적, g_0 는 평형상태의 간극, i_b 는 바이어스 전류를 나타낸다.

2.2 자기베어링 연성 축 모델

자기베어링과 연성 축 모델을 분리하여 모델링할 경우 연성축의 강체 모드에서 계산의 오류가 발생할 가능성이 있으므로 상용 프로그램 RODAP [5]을 이용하여 자기베어링의 변위 강성이 포함된 3차의 연성 주파수까지 포함된 자기베어링 연성축의 이론적 모델을 얻어 낸다

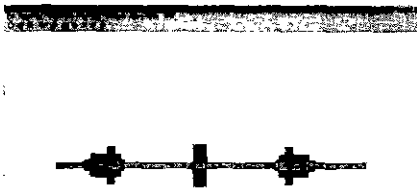


Fig. 1 Flexible MB rotor model of RODAP

2. 자기베어링 연성축의 식별

2.1 주파수 응답 측정

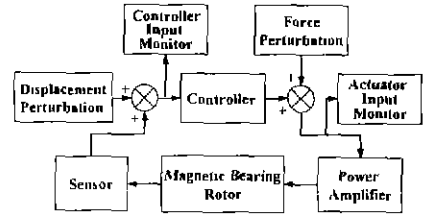


Fig 2 System block diagram for the measurement of open plant FRF

일차적으로 시스템의 주파수 응답 함수(FRF)를 얻기 위해 시스템의 입력 및 출력 신호의 주파수 스펙트럼을 평균하여 사용한다 입력은 작동기 입력 측정이고 출력은 제어기 입력 측정이며, 가진 함수로 사인함수를 이용하여 매 주파수 별로 수행한다 입력과 출력 신호의 주파수 스펙트럼을 각각 $U(j\omega) \in C^m$, $Y(j\omega) \in C^m$ 과 같이 나타내며, 이때 nu, ny 는 각각 시스템의 입력과 출력의 갯수를 나타낸다 시스템의 주파수 응답 함수 행렬 $G(j\omega) \in C^{m \times m}$ 은 식 (3)에 의해 얻을 수 있다[6]. 여기서 얻은 시스템의 주파수 응답은 제어기에 의한 시간 지연까지 포함된다.

$$G(j\omega) = Y(j\omega)U(j\omega)^{-1} \quad (3)$$

실험을 통해 얻어진 입력과 출력의 주파수 응답을 Fig 3에 나타내었다.

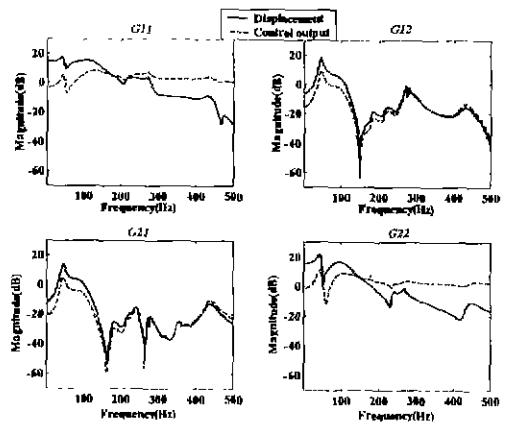
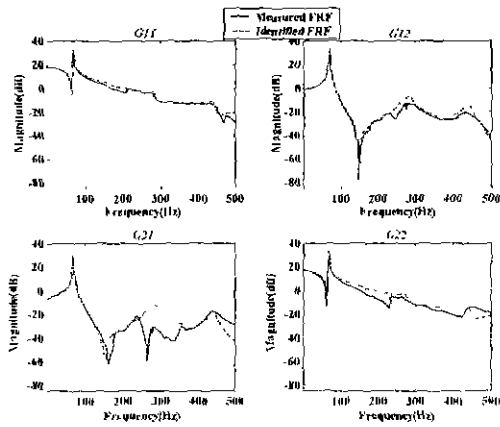


Fig. 3 Measured closed-loop frequency responses

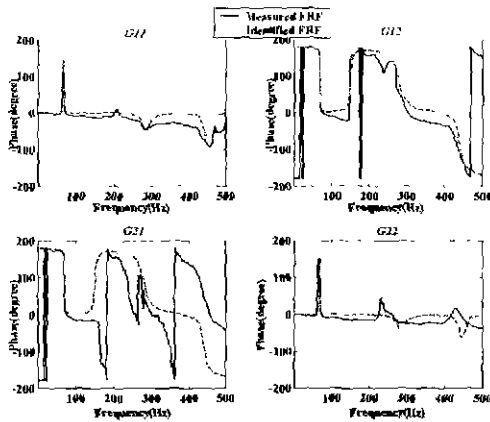
2.2 비선형 모달 식별

이론에서 얻은 모델의 모우드 모양은 매우 정확하다는 가정 아래서 비선형 모달 식별을 수행

한다. 비선형 오차제곱 최소법을 이용하여 저주파에서는 강제 모드 극점과 센서 및 자기베어링 전류 강성을 식별하고 나머지 연성 모우드는 각각의 고유 진동수 근방에서 주파수와 감쇠를 식별한다. 측정된 주파수 응답과 식별된 공칭 모델을 Fig 4에 나타내었다.



a) Magnitude



b) Phase

Fig. 4 Comparison of measured and identified FRFs

3. 무 제어기 설계

3.1 불확정성 모델링

여러 가지 모델링 오차를 고려한 강건한 제어기를 설계하기 위해 Fig 5에서와 같이 구조화된 불확정성을 모델링한다. 센서와 자기베어링은 변위강성에 각각 $\pm 5\%$, Balas 등[7]의 방법을 이용하여 강제 모드 공진 주파수에 $\pm 4\%$, 연성 모드 공진 주파수에 $\pm 2\%$ 의 불확정성을 모델링한다. 이론적 모델에 포함되지 않은 고차의 연성 모드 등을 고려하여 입력 단에 $\pm 5\%$ 의 곱셈형 불확정성을 첨가한다

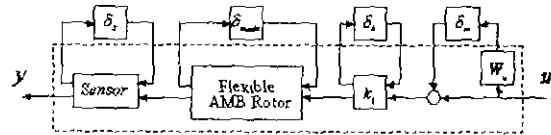


Fig 5 System model including various uncertainties

3.2 성능 가중함수

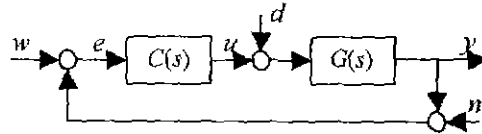


Fig 6 Closed-loop system

$$\begin{bmatrix} y(s) \\ e(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T(s) & S(s)G(s) & T(s) \\ S(s) & S(s)G(s) & S(s) \\ C(s)S(s) & T(s) & C(s)S(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w(s) \\ d(s) \\ n(s) \end{bmatrix}$$

(4)

자기베어링 인성축의 경우 불평형 질량에 의한 시스템의 응답인 $S(j\omega)G(j\omega)$ 의 최소화가 가장 중요한 성능이 된다. 외란에 대한 응답 성능뿐 아니라 제어 노력에 대한 주파수 응답인 $C(j\omega)S(j\omega)$ 도 중요하다. $C(j\omega)S(j\omega)$ 는 고주파에서 제어기의 형상을 결정할 뿐 아니라 덧셈형 시스템 오차에 대한 강건성을 나타내기 때문이다. 여기에 페루프 전달 함수인 $S(j\omega)$ 와 $T(j\omega)$ 의 적절한 모양을 선정하면 더 좋은 성능의 제어기를 얻을 수 있다. 아래의 Fig. 7은 본 논문에서 사용한 성능 가중 함수의 개략도이다

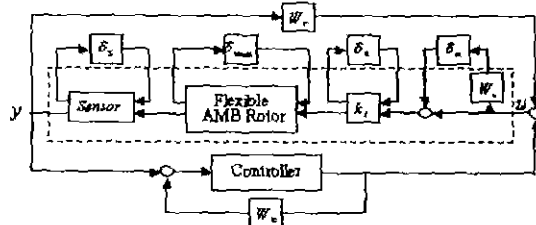


Fig. 7 Weighting scheme

3.3 혼합 불확정성을 고려한 무 제어기 설계

일반적인 시스템의 불확정성은 상태방정식의 계수의 변화와 같이 실수의 변화로 나타내어지는 것이 대부분이다 그런데 이것을 복소수의 변화로 모델링하고 복소 무 제어기법을 적용해도 되지만 제어기의 과도한 설계를 피할 수 없다. Young[8]은 복소 무 제어 설계 기법을 확장하여 실수 불확정성을

고려할 수 있는 혼합 뮤 제어 기법을 개발하였다. 본 논문에서는 센서 및 자기베어링 전류 어댑, 공진 주파수 등의 실수 불확정성과 곱셈형 오차, 성능 가중함수 등의 복소 불확정성을 고려하여 혼합 뮤 제어 기법을 적용하였다.

3.4 제어기 차수 축소

뮤 제어 기법으로 설계된 고차의 제어기는 직접 구현하기가 어려워서 차수를 낮추는 것이 필수적이다. 차수를 낮추는 방법에는 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 식 (5)와 같은 Wortelboer[9]가 제안한 방법을 이용하였다.

$$\text{Min sup}(\mu_s(F_r(P, C) - F_r(P, C_r))) \quad (5)$$

이 방법은 패루프 전달함수를 고려하여 제어기의 차수를 낮추기 때문에 전체 시스템의 성능에 큰 영향을 주지 않는다 Fig 8에 설계된 제어기와 차수가 낮아진 제어기의 안정성과 강인 성능을 비교하였다.

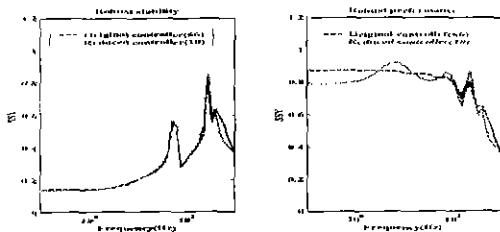


Fig. 8 Robust stability and performance of reduced controller

4. 실험 결과

4.1 자기베어링 연성 축 시스템

Fig. 9a)에 도시된 자기베어링 연성 축 시스템은 벤트리 배바다의 로터킷 실험 장치를 보완한 것으로 기구적 설계를 이용하여 실험 장치의 재설치로 인한 축의 어긋남을 방지하였다. 10000rpm 까지 속도가 제어되는 직류모터를 연성 커플링으로 자기베어링 연성 축과 연결하였다. 그리고 Fig. 9b)는 정전 용량센서가 내장된 자기베어링 유닛이 로터킷용 하우징에 조립된 상태와 연성 축 자기베어링 로터 유닛을 나타낸 것이다.

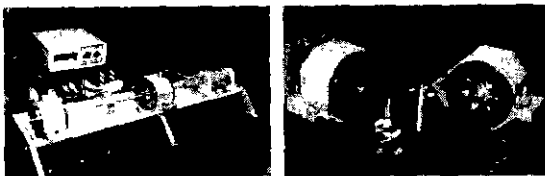


Fig. 9 a) Flexible MB rotor system b) Mb and rotor Unit

5. 결론

자기베어링 연성 축에 비선형 모달 식별과 강인 제어를 적용하여 1차 휨 진동 이상까지 안정적인 운전에 성공하였다. 불확정성이 많은 자기베어링 연성 축 시스템의 성능 향상에 본 논문의 방법이 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 기계분야 BK-21 사업의 지원하에 수행되었으며, 이에 감사 드립니다. Young, P.M., Wortelboer, P.M.R 그리고 Schonhoff, U에게도 감사 드립니다.

참고문헌

- Gahler, C., Mohler, M., Herzog, R., "Multivariable Identification of Active Magnetic Bearing Systems", *JSME International Journal C*, Vol. 40, No. 4, pp 584 - 592, 1990
- Fitro, R.L., Knospe, C.R. "μ-synthesis control design applied to a high speed machining spindle with active magnetic bearing", 6th int. symp. On magnetic bearings, Cambridge, MA, USA, pp. 449-458, 1998.
- Losch, F., Gahler, C., Herzog, R. "μ-synthesis controller Design For A 3MW Pump running in AMBs", 6th int. symp. On magnetic bearings, Cambridge, MA, USA, pp 415-428, 1998.
- Schonhoff, U., Luo, J, Li, G., Hilton, E., Nordmann, R., Allaire, P., "Implementation Results of μ-synthesis Control for an Energy Storage Flywheel Test Rig", 7th int. symp. On magnetic bearings, ETH Zurich, Swiss, pp. 317 - 322, 2000.
- RODAP(Rotating machine Design and Analysis Program), D&M Technology Co.
- Pintelon, R., Guillaume, P., Vandersteen, G., and Rolain, Y., "Analyses, Development and Applications of TLS Algorithms in Frequency Domain System Identification", *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 1998
- Balas, G.J., Young, P.M., "Control Design for Variations in Structural Natural Frequencies", *J of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 18, No. 2, pp-325-332, 1995.
- Young, P.M., "Controller Design with Real Parametric Uncertainty", *Int. J. of Control*, Vol 65, No. 3, pp. 469-509, 1997.
- Wortelboer, P.M.R., "Frequency-weighted Balanced reduction of Closed-loop Mechanical Servo-systems: Theory and Tools", Ph. D. Thesis, Delft Uni. Of Tech., 1994.