

디지털 PWM전류 앰프를 이용한 자기 베어링 제어기 설계

이 기 창, 정 연 호, 구 대 현, 이 민 철*
 한국전기연구원 전동력연구그룹, *부산대학교 기계공학부

Design of Active Magnetic Bearing Controller Using PWM Current Amplifier

Ki-Chang Lee, Yeon-Ho Jeong, Dae-Hyun Koo, Min-Chul Lee*
 Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), *Pusan National Univ.

Abstract - 능동형 자기베어링과 보(Beam)와 피봇으로 구성되는 시소(SISO)는 제어적 관점에서 보면 많은 유사성이 있다. 본 논문에서는 Carl R. Knospe 등이 제안한 보와 피봇을 이용한 1자유도 자기베어링 시뮬레이터를 실제 제작하여, 비례·미분·적분 제어 알고리즘을 적용한 디지털 제어기와, 큰 힘을 발생시키기 위해서는 필연적인 전자식 코일의 큰 인덕턴스에 의해 제한되는 Bandwidth(BW)를 보상하기 위해 앞섬 보상을 가지는 전류제어기를 구현하였다. 복잡한 자기베어링 시스템을 기구적으로 간단한 보와 피봇 시스템으로 상사시킴으로써, 자기베어링 제어 알고리즘 개발 및 파라미터 튜닝의 목적을 달성할 수 있었다.

표 1. 제작된 1자유도 AMB 시뮬레이터의 파라미터

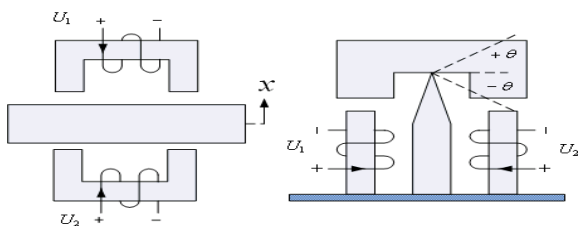
보의 길이	330 [mm]	코일의 턴 수, N	286 [턴]
Pivot과 전자식 중심까지의 거리	149[mm]	코일의 저항	1.46 [Ω]
평균공극길이	0.3 [mm]	Pole 면의 넓이	384 [mm ²]

1. 서 론

능동형 자기베어링(Active Magnetic Bearing, AMB)은 S2M, MECOS 등이 처음 상용화 시켰으며, 현재에는 터보 분자 펌프, 초소형 터보 송풍기 등 소형 터보기기에서 수백 kW급 터보 압축기나 터보 송풍기 등에 적용하려는 시도가 활발하다. 국내에서도 수백 kW급 터보 압축기와 송풍기의 개발이 삼성 테크윈, 한국 터보 등에서 활발히 이루어지고 있으며, 한국전기연구원에서 200kW, 30,000 rpm 고속 회전기 개발에 능동형 자기베어링을 채용하였다. 최근 능동형 자기베어링은 점점 전통적인 기계적인 베어링을 대체하고 있는 추세이다. AMB는 컴프레서, 밀링용 스펀들 등의 고속 회전체의 많은 영역에서 사용되어 왔다. 또한, AMB는 특히 초고속 회전을 할 수 있기 때문에, 플라이휠 에너지 저장 응용에 아주 적합하다. 자기베어링을 채용하고 있는 플라이휠 시스템이 기존 베어링에 비해 훨씬 큰 에너지를 저장할 수 있다.

자기베어링은 위치 제어를 통하여, 불안정한 시스템을 안정화 시키는 시스템이므로, 그 제어 알고리즘 개발 및 파라미터 튜닝이 무엇보다도 중요하다. 하지만 원동형 구조의 자기베어링은 그 구조가 1 자유도 시스템이라 해도 제작에는 많은 비용과 노력이 소모된다. Carl R. Knospe, Jeffrey D. Lindlau가 이러한 보를 이용한 자기베어링 시뮬레이터를 제안하였으며, Shailesh Pradhananga 등은 이를 이용하여, 복잡한 자기베어링의 특성을 기계적으로 간략화 시켜서, 제어문제에 집중함으로써 효과적인 제어 알고리즘을 도출하였다. [1][2][3] 그림 1에 능동형 자기베어링과 보와 피봇으로 구성되는 시소 구조 사이의 유사성을 보였다. 자기베어링에서는 로터의 변위 운동이, 시소구조에서는 보의 회전이 비접촉 센서에 의해 측정된다. 자기베어링과 시소구조는 모두 동일한 사양의 두 코일에 의해 구동되는 구조를 가지며, 특정 마이스 포인트에서 선형화 제어를 하기 위하여, 차분(Differential) 제어된다.

그림 1에 나타난 것처럼 1 자유도 능동형 자기베어링의 모델은 보와 피봇을 이용하여 모의될 수 있다. 보와 피봇 구조는 1축 능동형 자기베어링의 동력학적 특성과 많은 유사성이 있다. 이 구조는 전형적인 능동형 자기베어링의 모든 비선형 특성을 가지고 있으면서도, 기계 구조적인 관점에서는 아주 심플한 구조이다. 또한 대부분의 능동형 자기베어링 시스템처럼 개루프 불안정하다. 이러한 보와 피봇을 이용한 시소구조의 시뮬레이터를 이용하면, 보다 복잡한 자기베어링의 제어 문제를 기계적으로 간단히 만들어서, 제어문제에 집중할 수 있다.

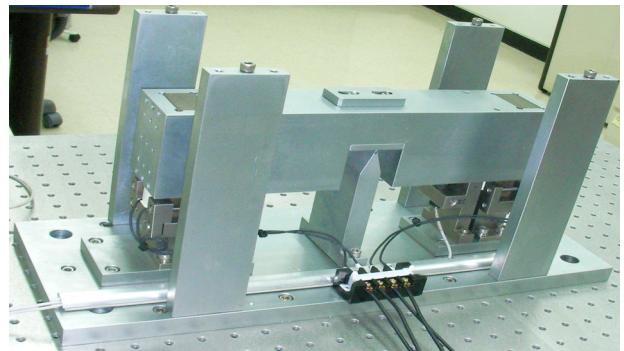


〈그림 1〉 1자유도 능동형 자기베어링의 유사성

2. 본 론

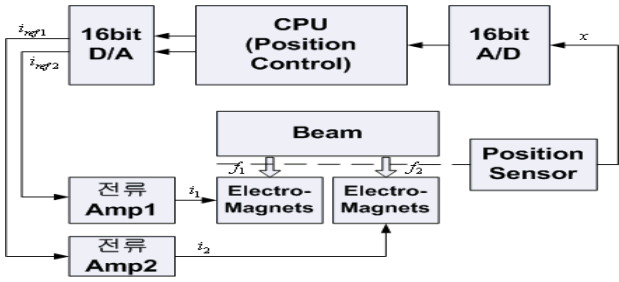
2.1 실험장치의 구성 및 셋업

실험 장치는 2개의 전자식(구동기), 변위센서 및 전류센서, 파워 앰프 및 디지털 제어기 등 다양한 구조 및 기계 요소로 구성된다. 디지털 제어기는 실시간 제어 알고리즘을 구현, 파라미터 온라인 조정, 데이터 취득을 담당한다. 크고 단단한 보는 보의 무게중심 (COM, Ceter Of Mass)에 위치한 피봇에 대해서 1자유도 회전만 가능하다. 보의 각 끝단에 위치한 전자식은 제어 힘을 제공한다. 피봇과 전자식은 무거운 강철 베이스에 단단하게 고정된다. 실험을 위하여 보(beam)와, 2개의 전자식 및 변위센서와 전류 센서, 두 개의 PWM 전류 Amp 및 디지털 제어기로 능동형 자기베어링 시뮬레이터를 구성하였다. 그림 2에 제작된 시뮬레이터의 실험사진을 보인다. 표 1에는 제작된 시뮬레이터의 파라미터를 제시하였다.



〈그림 2〉 보와 피봇으로 구성된 자기베어링 시뮬레이터

그림 3에 구성품을 상호 연결하는 블록도를 제시하였다. 보의 변위와 코일의 전류는 측정은 와전류 타입의 변위센서와 전류 센서를 이용하여 측정된다. 위치 제어기의 출력 제어 신호는 D/A 컨버터로 전달되어 Power Amp의 입력으로 들어가며, 이 입력값에 따라 전류 제어를 수행한다. 변위센서 및 전류센서들로부터 측정된 보의 변위 및 코일의 전류는 16-bit A/D 컨버터에 임해서 DSP로 전달된다. DSP에서 실행되는 제어 알고리즘은 센서 측정값에 따라서 출력 제어 전류를 결정하고, D/A 컨버터를 통해 파워 앰프로 전달된다. 파워 앰프는 결정된 각 코일 사이에 결정된 전압을 인가한다. 보의 전자식에서 발생된 힘에 따라 반작용하며, 센서들은 새로운 값을 생성하여 시스템을 궤환 시킨다.



〈그림 3〉 제어 시스템 블록도

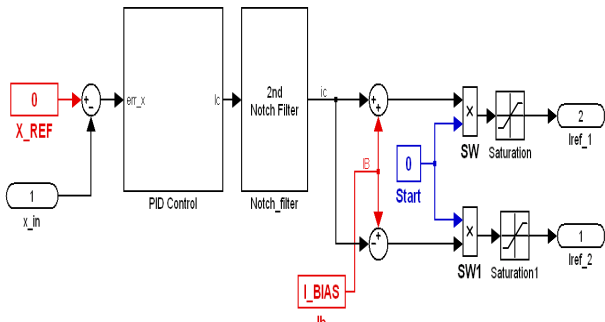
3. 제어기의 구성

제작된 빔 구조의 자기베어링 시뮬레이터를 제어하기 위하여, 비례·미분·적분(PID) 제어기를 구성하였다. 자기베어링은 공중에 떠있는 질량으로 모델링 할 수 있으며, 이는 Damping이 없거나 아주 작은 구조로서, 위치 강성(Position Stiffness)도 음의 값을 가지므로 항상 불안정한 시스템이다. 이를 폐환 제어를 통하여 안정화시키기 위해서는 비례·미분 제어기를 사용하여 폐루프 전달함수의 폴(Pole)을 S-평면의 좌반 영역으로 옮길 수 있다. 또한 적분 제어기를 추가함으로써, 정상상태 오차를 0으로 만들 수 있으나, 과도한 적분상수의 값은 시스템을 불안정하게 만들 수 있으므로 그 값의 선정에 주의하여야 한다.

3.1 제어시스템의 하드웨어 구조

그림 3에 나타난 제어 블록을 구현하기 위하여, Mathworks 사의 Matlab/Simulink 및 Realtime Workshop 툴을 사용하였다. 먼저, 자기베어링의 위치제어기를 Simulink 모델로 만들어서, 소프트웨어적으로 검증을 한 후, 최종적으로 Realtime Workshop을 지원하는 dSPACE 사의 DS1003 시뮬레이션 보드에 제어 알고리즘을 구현하였다. 제어기에서의 샘플링 주기는 5kHz로 동작시켰다. 전자석 코일의 구동을 전류 앰프로는 Copely Controls 사의 4212 PWM 전류 앰프를 사용하여, 50(V)의 DC 링크 전압으로 코일을 구동시켰다. 위치 변위 센서로는 누설자속 타입의 갭센서(Proximeter)를 사용하였다.

그림 4에 PID 제어 루프를 가지는 Matlab/Simulink 모델을 제시한다. 본 논문에서는 Bias 전류의 크기에 따라 동작점을 달리하면서, PID 파라미터를 구하였다. 제어기 출력 측 2차 노치 필터는 제어기가 보의 고유진동수와 동일한 주파수로 보를 가진 시켜 시스템이 불안해 지는 것을 막기 위해, 보의 고유진동수 근처의 밴드를 억제하는 용도로 사용하였다. 그림에서 제어기 출력 값에 바이어스 전류를 더하거나 감함으로써 Differential하게 제어하는 데, 이는 바이어스 전류를 사용하여, 선형화 점을 찾고, 이 선형화된 점에서 시스템의 거동을 해석하여 PID 제어 게인을 찾는다.



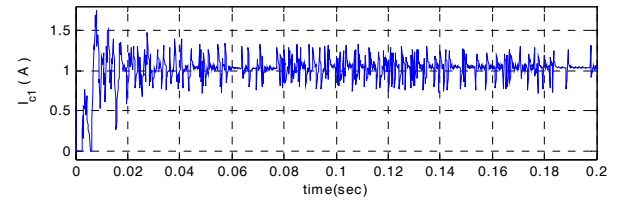
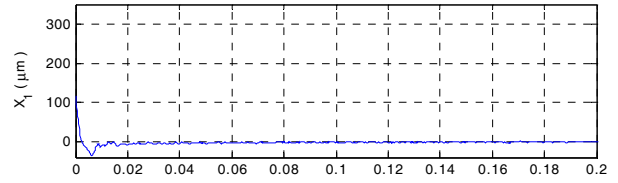
〈그림 4〉 위치 제어 (PID 제어) 시스템 블록도

3.2 자기베어링 전류제어기의 특성

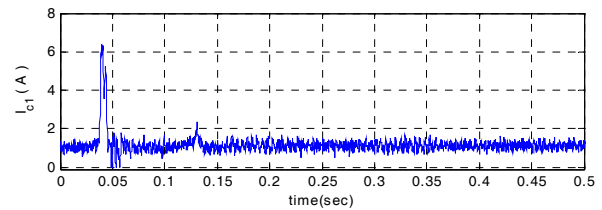
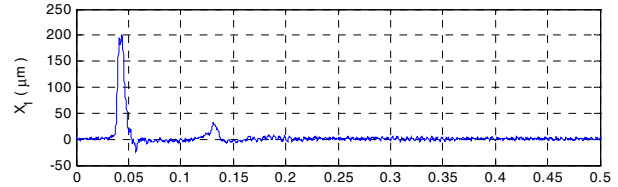
전류제어기를 아날로그 앞섭 보상기 (Lead Compensator)를 이용하여 구성하였다. 자기베어링에서는 큰 힘을 내기 위해서는 기자력(AT)을 높여야 하지만 이는 부수적으로 제어 코일의 인덕턴스를 증가시킨다. 즉 코일의 시정수를 증가시켜서 BW(Bandwidth)를 감소시킨다. 한정된 DC 링크 전압으로 코일에 흐르는 전류제어기의 Bandwidth를 증가시키기 위해서 극배치 (Pole Placement)법을 이용한 앞섭 보상기를 설계하였으며, 이 설계값을 Op-amp 회로로 구성되는 전류제어기에 적용하여 시험하였다.

4. 실험 결과

그림 5는 구현된 초기 부상제어의 결과를 제시한다. 보의 좌측 변위 값인 x_1 은 초기 위치 $300\mu\text{m}$ 에서 0으로 수렴하였으며, 이때 제어 전류는 1(A)였다. 그림 6은 상대 갭이 0으로 유지되고 있는 순간 임펄스 외란을 주었을 때의 시스템 응답이다. 임펄스 외란으로 무게 10g의 물체를 10cm 높이에서 떨어뜨렸다.



〈그림5〉 PID 게인 튜닝을 통한 초기위치 부상 제어 결과



〈그림 6〉 임펄스 외란에 대한 부상 응답

5. 결론

보(Beam)와 전자석으로 구성되는 1자유도 능동형 자기베어링 시뮬레이터를 제작하였다. 표 1에 그 상세한 파라미터를 제시한다. 이러한 시뮬레이터를 이용하여, Lead-Lag Compensator로 구성되는 전류 제어기를 구성하고 PID 위치 제어기를 구성하여, 잘 동작됨을 보였다. 이러한 시뮬레이터를 이용하여, 향후에는 외란, 비선형 성 등에 보다 효과적으로 대처할 수 있는 슬라이딩 모드 제어기법 등의 비선형 제어기를 도입해 볼 예정이다.

[참고 문헌]

- [1] Carl R. Knospe, "The Nonlinear Control Benchmark Experiment", Proceedings of the American Control conference, Chicago, Illinois, June 2000.
- [2] Jeffrey D. Lindlau and Carl R. Knospe, "Feedback Linearization of an Active Magnetic Bearing With Voltage Control", IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 10, No. 1, January 2002.
- [3] Shailesh Pradhananga, "Experimental Validation of a Smart-Bias Active Magnetic Bearing Controller", B.S. Thesis in Regional Institute of Technology, Jamshedpur, India, August, 2004.
- [4] 김정재, 송승호, "선형화 기법을 사용한 자기부유기 모델링과 DSP기반 가변 위치 제어", 전력전자학회 논문집 제9권 제2호, pp.158~162, 2004.
- [5] 임정식, 설승기, 안형준, 최상현, "자기베어링의 센서리스 위치 제어", 전력전자학회 학술대회 pp.420~423, 2003.