

<https://doi.org/10.7236/IIIBC.2019.19.1.225>

IIIBC 2019-1-30

높은 자기부상 정밀도를 갖는 자기베어링 제어기 개발

Development of Magnetic Bearing Controller with High Magnetic Levitation Accuracy

이석원*, 허헌**

Seokwon Lee*, Heon Huh**

요약 자기베어링은 기계적인 마찰이 없고 안정적인 동역학 특성을 갖기 때문에 진공 및 청정 환경이나 고정도가 요구되는 분야에서 많이 활용되고 있다. 그러나 자기베어링은 다양한 장점에도 불구하고 일반적으로 제어기가 복잡해서 적용 범위의 확산이 제한적이다. 본 논문에서는 복잡도가 낮은 디지털 방식의 자기베어링 제어기를 제안하였다. 또한 디지털 제어기 성능 열화의 주된 원인인 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 과정에서 발생하는 오류와 제어 알고리즘 구현상의 문제점들을 분석하고 해결하였다. 제안한 제어기를 실제 자기베어링에 적용한 실험을 통해 제어기가 자기부상 목표 정밀도를 갖는 것을 확인하였다.

Abstract Magnetic bearings are widely used in vacuum and clean environments or in high-precision applications, because they have no mechanical friction and have stable dynamic characteristics. Despite the aforementioned advantages of magnetic bearings, their applications are generally limited due to the controller complexity. In this paper, we proposed a reduced-complexity digital controller for magnetic bearings. In addition, we analyzed and solved the problems, such as quantization errors in the analog-to-digital conversion and integral windup in a feedback controller, which are known as the main causes of performance degradation. Experiments showed that the proposed digital controller achieves a target magnetic levitation accuracy.

Key Words : Magnetic bearing, Magnetic levitation, Digital controller, Quantization error

1. 서론

RTP(Rapid Thermal Processing) 공정을 포함하여 고온, 진공, 청정 환경에서 사용하는 반도체 장비를 중심으로 구동부의 정밀도 및 신뢰성 향상 요구에 대응할 수 있는 방안으로 자기부상모터를 적용한 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 자기베어링은 자기부상모터 시스템에서 모터를 부상시키기 위한 핵심 부품으로서 일반적인 베어

링과는 달리 많은 제어 장치 및 전류 증폭기와 제어 알고리즘이 필요하며, 제어기의 게인 튜닝에도 상당한 시간과 노력이 요구된다. 그러므로, 실제 공정에 적용할 수 있는 자기부상 정밀도를 확보하는 동시에 일정시간 경과 후 발생할 수 있는 진동 문제를 해결할 수 있는 기술적 해법이 필요하다^[1].

자기베어링은 대상 물체를 자력을 이용하여 공중으로 부상시키기 때문에 접촉으로 인한 기계적인 마찰이 거의

*정회원, 한국산업기술대학교 메카트로닉스공학과(제1저자, 교신저자)

**정회원, 한국산업기술대학교 메카트로닉스공학과
접수일자 2018년 12월 3일, 수정완료 2019년 1월 16일
게재확정일자 2019년 2월 8일

Received: 3 December, 2018 / Revised: 16 January, 2019 /

Accepted: 8 February, 2019

*Corresponding Author: lsw@kpu.ac.kr

Dept. of Mechatronics Eng., Korea Polytechnic Univ., Korea

없고, 이로 인해 윤활유가 필요하지 않아 진공 및 청정 환경에서 사용하기에 적합한 특성을 갖고 있다. 또한 자기베어링의 능동제어를 통하여 일반 베어링에서는 불가능한, 대상 기계의 공진영역에서의 안정적인 동역학적 움직임을 얻을 수 있다. 이러한 이유로 자기베어링에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 다양한 분야에서 적용이 확산되고 있다^[2].

본 논문에서는 자기부상모터 시스템에서 핵심 부품인 자기베어링 제어를 위한 제어기 구성 및 알고리즘을 제안하고 실제 제어기를 구현하여 그 실험 결과를 분석하였다. 구현한 시스템의 운용 실험 결과 실제 장비에 적용할 수 있는 자기부상 정밀도를 달성할 수 있음을 확인하였다.

II. 자기베어링 제어기 구현 방법

자기베어링 제어를 위한 반경 방향의 전자기 코일은 1쌍의 차동형 코일로 구성하였으며, 이를 제어하기 위해서는 다음 그림 1과 같이 2개의 전류 제어기와 1개의 위치 제어기가 필요하다. 따라서 X-Y 2축 반경 방향 제어를 위해서는 총 4개의 전류 제어기와 2개의 위치 제어기가 필요하며, 각 전류 제어기마다 전류 드라이버가 설치되어 코일에 전류가 흐르게 된다. 1개의 원형 코일로 구성된 수직 방향은 1개의 전류 제어기와 위치 제어기만 필요하며, 제어 방식은 반경 방향과 같다.

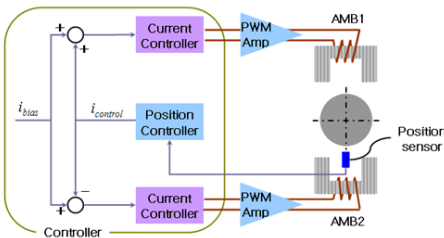


그림 1. 자기베어링 제어기 구성도
Fig. 1. Schematic diagram of magnetic bearing controller

다음 블록선도는 전류 제어기의 제어 알고리즘을 나타낸 것이다. 기본적으로 전류제어 알고리즘은 PI 제어 방식을 사용하며, 이때 코일에 흐르는 전류를 제한 받아서 레투프 제어를 수행하게 된다. 각각의 P 게인 값과 I 게인 값은 코일의 인덕턴스와 저항, 그리고 설정 대역폭 주파수에 따라 결정된다.

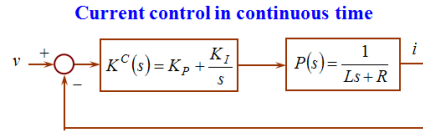


그림 2. 전류 제어기 블록선도
Fig. 2. Block diagram of the current controller

제어에 필요한 제어기의 전달함수를 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{K^C(s)P(s)}{1 + K^C(s)P(s)} \quad (1)$$

$$= \frac{\left(K_p + \frac{K_I}{s}\right)\left(\frac{1}{Ls + R}\right)}{1 + \left(K_p + \frac{K_I}{s}\right)\left(\frac{1}{Ls + R}\right)} \quad (2)$$

$K_p = L\omega_c$, $K_I = R\omega_c$ 로 설정하고 정리하면

$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{\frac{\omega_c}{s}}{1 + \frac{\omega_c}{s}} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (3)$$

단, 수식 (3)에서 ω_c 는 cut-off 주파수이다.

다음 그림 3에서 위치 제어기의 PID 제어 알고리즘을 DSP(Digital Signal Processor) 상에서 구현할 때 사용한 방법을 정리하였다^{[3][4]}. DSP에서는 디지털 방식의 신호를 사용하기 때문에 기존 아날로그 방식의 제어 방법에 디지털 신호에 대한 고려를 추가하여야 한다. 본 논문에서는 양자화를 위한 방법으로 수정된 MPZ(Matched Pole-Zero) 방법을 사용하였으며^[5], 라운드오프(round-off) 에러를 최소화하기 위해 병렬 처리 방식을 사용하였다^[6].

$$K^C(s) = k \left[1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{1 + T_D s/N} \right]$$

using Modified MPZ method

$$K(z^{-1}) = k \left[1 + \frac{T}{T_{id}} z^{-1} + \frac{T_{Dd}}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 - \alpha z^{-1}} \right]$$

$$T_{id} = T_I, T_{Dd} = NT, \alpha = e^{-NT/T_D}, T: 1 \text{ sample period}$$

$$u_k = K(z^{-1})e_k$$

$$v_k^I = v_{k-1}^I + (T/T_{id})e_{k-1}$$

$$v_k^D = v_{k-1}^D + (T_{Dd}/T)(e_k - e_{k-1})$$

$$u_k = k(e_k + v_k^I + v_k^D)$$

그림 3. 위치 제어기의 제어 알고리즘 구현
Fig. 3. Implementation of position control algorithm

제안한 방법으로 자기베어링 제어시 오랜 시간 동안 적분 제어가 수행되었지만 자기부상 모터가 목표대로 동작하지 못하였을 경우 입력 값이 계속 누적되어 과도하게 커질 수 있기 때문에 전류 제어 및 위치 제어를 수행시 적분 제어의 세밀한 적용이 필요하다. 이러한 경우를 대비하여 anti-windup 루프를 추가하여 입력 값이 과도하게 증가하는 경우를 제한하였다^[7].

다음 블록선도는 전류 제어기와 위치 제어기로 구성된 전체 시스템의 제어기 블록선도이다. 위치 센서로부터 위치 정보 값을 입력 받아서 기준 위치와 차동한 후 위치 에러 값을 취환 받아 위치제어기를 통하여 입력 전류신호를 계산한다. 그리고, 입력 전류신호를 현재 자기부상 모터에 흐르고 있는 전류신호와 비교한 후 전류 에러 값을 전류제어기에 입력하여 최종적으로 전류제어기는 코일에 인가하는 전압을 조정하게 된다. 이때 전압은 PWM(Pulse Width Modulation) 방식을 사용하여 코일에 인가한다.

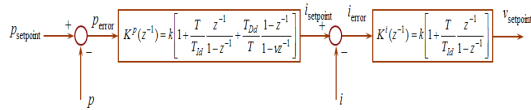


그림 4. 전체 제어기 블록선도
 Fig. 4. Block diagram of the overall controller

자기베어링은 기본적으로 불안정한 시스템이기 때문에 이를 안정하게 하기 위해서는 대상 물체의 위치를 측정하여 제어기에 취환하여야 한다. 이때 대상 물체의 위치를 측정하기 위한 위치 센서가 필요한데, 자기 베어링에 적합한 위치 센서는 비접촉 방식, 증폭기와 베어링의 대역폭보다 충분히 높은 주파수 특성, 내구성과 안정성을 보유해야 한다.

일반적으로 자기베어링 시스템에서는 열 변형이나 원심력에 의한 효과를 제거하기 위하여 한 쌍의 위치센서를 차동형으로 사용하는데, 위에서 열거한 특징을 보유한 위치센서의 종류는 인덕티브 방식, 캐패시티브 방식, 광학 방식, 와전류 방식 등이 있다^[8]. 본 논문에서는 고가이지만 높은 대역폭 및 분해능과 넓은 사용 온도 범위를 갖는 와전류 방식의 위치 센서를 사용하였다. 와전류 방식은 일반적으로 회전 기계에서 많이 사용되며, 소형이고 자기 노이즈에 강하여 대상 물체가 강자성체일 필요가 없다는 장점이 있다.

III. 실험 및 결과

본 논문에서 제안한 자기베어링 제어기 및 전류 증폭기를 구현하여 자기부상 정밀도를 실험한 결과 그래프는 다음과 같다. 동작 영역인 300[RPM] 내에서 XYZ 방향 50[um] 이내의 자기부상 정밀도를 갖는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 정지시 ±1[um] 이내의 자기부상 정밀도를 달성하였다.

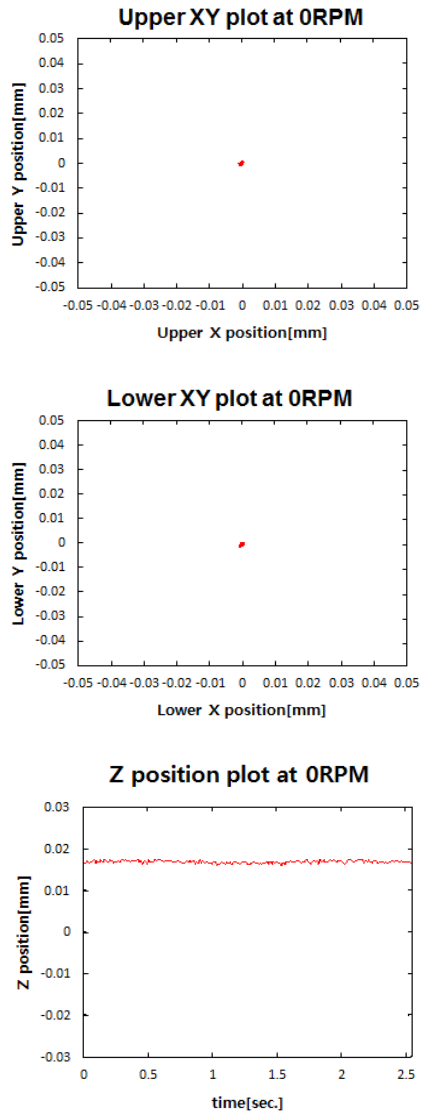


그림 5. 정지시 자기부상 정밀도
 Fig. 5. Accuracy of magnetic levitation at 0[RPM]

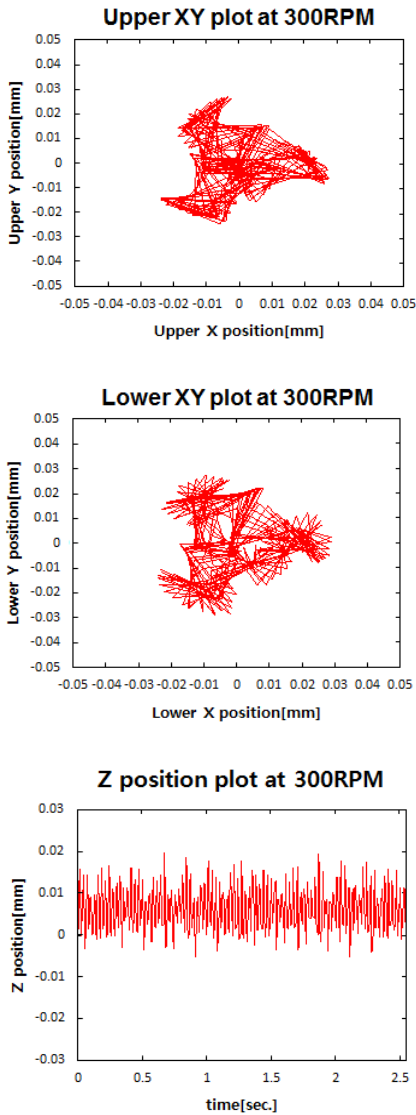


그림 6. 300[RPM] 동작시 자기부상 정밀도
Fig. 6. Accuracy of magnetic levitation at 300[RPM]

회전 속도에 따른 반경 방향 부상 정밀도를 다음 그림에서 도시하였다. 회전 속도가 증가할수록 회전 반경도 증가하는 것으로 나타났으나, 전 구간에 걸쳐서 본 연구의 목표인 50[μ m] 이내의 회전 정밀도를 달성하였다.

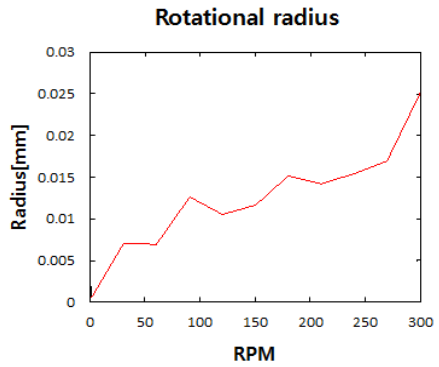


그림 7. 회전 속도에 따른 자기부상 정밀도
Fig. 7. Accuracy of magnetic levitation according to RPM

IV. 결론

본 논문에서는 진공 및 청정 환경에서의 고속 모션 제어에 적합한 자기부상 기술의 핵심적인 요소인 자기베어링 제어 기법을 제안하고 제어기를 구현하여 실험결과를 제시하였다. 실험 결과는 실제적인 자기부상 동작 영역에서 안정적인 자기부상 정밀도를 보여 주었으며, 이 결과를 바탕으로 한 자기부상 기술은 다양한 반도체 공정 및 로봇 제어기 개발에 활용할 수 있으리라 기대된다.

References

- [1] Lang, J. Wassermann and H. Springer, "Adaptive vibration control of a rigid rotor supported by active magnetic bearings," ASME J. Eng. Gas. Turb. Power, vol. 118, no. 4, pp. 825 - 829, 1996.
- [2] G. Schweitzer and E. Maslen, *Magnetic Bearings: Theory, Design and Application to Rotating Machinery*, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009.
- [3] H. J. Yeo, "Design and Implementation of a Robust Controller Using DSP," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS), Vol. 7, No. 3, pp. 325-331, 2006.
- [4] H. S. Cho, "Design of PID-Expert hybrid Controllers," The Journal of KIIECT, Vol. 2, No.

3, pp. 103-108, 2009.

- [5] G. F. Franklin, J. D. Powell and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [6] E. C. Ifeachor and B. W. Jervis, *Digital Signal Processing: A Practical Approach*, 2nd ed. Harlow, U.K.: Prentice-Hall, 2002.
- [7] K. J. Astriim and L. Rundqwist. "Integrator windup and how to avoid it". In Proceedings of the 1989 American Control Conference, pp. 1693-1698, 1989.
- [8] S. D. Welsby and T. Hitz, "True Position Measurement with Eddy Current Technology". *Sensors Magazine*, vol. 14, no. 11, pp. 30-40, 1997.

저자 소개

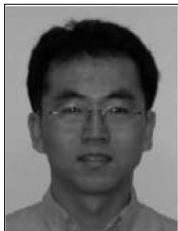
이 석 원(정회원)



- 1991년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학사)
- 1993년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학석사)
- 1998년 8월 : 서울대학교 전기공학부(공학박사)
- 2004년 ~ 현재 : 한국산업기술대학교 메카트로닉스공학과 교수

• 주 관심분야 : 스마트팩토리, 산업용 네트워크, 로봇제어

허 현(정회원)



- 1992년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학석사)
- 2004년 12월 : Purdue University 전기전자공학과(공학박사)
- 2009년 ~ 현재 : 한국산업기술대학교 메카트로닉스공학과 부교수

• 주 관심분야 : 무선통신, 통계학적 신호처리, IoT 응용 시스템

※ 이 논문은 2018년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 결과물임
(NRF-2018R1D1A1B07045417)