

ATmega128 소자를 이용한 자기베어링 제어(실험을 중심으로) Control of Magnetic Bearing using ATmega128(Focused on experiments)

양주호* · 최고호***† · 정광교***

Joo-Ho Yang*, Gyo-Ho Choi***† and Kwang-Gyo Choung***

(접수일 : 2012년 02월 26일, 수정일 : 2013년 04월 09일, 채택확정 : 2013년 08월 23일)

Abstract: Because the magnetic bearing supports levitating body without contact, wear, noise and vibration, it is very useful to high revolution machinery. In this paper we selected ATmega 128, a less expensive and widely used micro controller, for control the magnetic bearing system. And we selected the sampling time and the control gain of PID controller through trial-and-error. The control program of the one board controller utilized lookup table to reduce calculation time, and bit shifting for the integer calculation in instead of floating point calculation. As the results, the controller carried out relatively high speed PID control on sampling time 0.25 ms. At last the rotation test for the magnetic bearing system was carried out by 3 phase induction motor and air turbine.

Key Words : Magnetic Bearing System, Levitating Body, Lookup Table, PID Controller

1. 서 론

자기베어링은 기계적 접촉부를 가지지 않기 때문에 마찰, 마모가 없어 반영구적이면서 윤활과 밀봉의 필요성이 없어 진공과 고·저온 등 특수한 환경에서의 사용이 가능하며 접촉식베어링으로 실현할 수 없는 고속 회전용으로 널리 이용되고 있다.¹⁻⁵⁾

최 등⁶⁾은 전류의 세제곱에 비례하고, 간극의 제곱에 반비례하는 전자석의 흡인력식을 제안한 바 있다. 이것은 자기베어링 시스템이 비선형성을 내포하고 있음을 의미한다.^{7,8)}

정⁹⁾은 비선형성을 내포하는 자기베어링 시스템

에 대해 통상의 선형 모델식을 대신하여 Simulink 프로그램을 이용, 비선형 요소를 포함하여 이산화, 양자화 및 시간지연 요소 등을 반영, 최대한 실제 계에 가깝게 모델링하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 최적의 샘플링타임과 PID 제어기의 파라미터를 선정하였다.

본 연구에서는 정⁹⁾의 시뮬레이션 결과를 기초하여 저가 보급형인 ATmega128 원보드 컨트롤러를 사용하여 만족할만한 제어성능이 확보 가능한지를 실험을 통하여 확인해보고자 했다.

처리속도와 정수연산만 가능한 ATmega128 원보드 컨트롤러의 단점을 보완하며 가능한 한 빠른 샘플링 타임을 구현하고 최대한 연산시간을

***† 최고호(교신저자) : 강원도립대학 해양경찰과

E-mail : ghchoi@gw.ac.kr, Tel : 033-660-8204

*양주호 : 부경대학교 기계시스템공학과

***정광교 : 선박안전기술공단

***† Gyo-Ho Choi(corresponding author) : Department of Marine Police & Technology, Gangwon Provincial College.

E-mail : ghchoi@gw.ac.kr, Tel : 033-660-8204

*Joo-Ho Yang : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

***Kwang-Gyo Choung : Korea Ship Safety Technology Authority.

줄이기 위한 방법으로, 제어출력을 미리 계산된 Lookup table로 작성하여 프로그램 메모리에 다운로드 하였고, 실수연산으로 할 수 밖에 없는 적분 계산은 비트처리로 계산을 대신 함으로써 연산시간을 획기적으로 줄일 수 있었다.

자기부상체의 부상실험을 통해 스텝응답과 외란제거성능을 검토하였다. 또한, 자기부상체를 부상된 상태로 유지하면서 유도전동기 및 에어터빈에 의한 축 회전구동 실험을 수행하고 그 결과를 검토하였다.

2. 실험장치의 구성

2.1 전체구성도

Fig. 1은 자기베어링 시스템의 실험장치 사진으로 각 부분은 다음과 같다. ①은 자기베어링과 3상유도전동기가 설치되어 있는 부분으로, 자기베어링은 양단에, 축을 고속으로 회전시키는 유도전동기는 중앙부 위치한다. ②는 센서신호의 증폭부로 자기부상체의 위치(gap)를 검출하는 와전류 변위센서이다. ③은 전자석을 구동시키는 전류증폭기이다. ④는 축의 회전수 및 각종 파형을 계측하기 위한 오실로스코프이다. ⑤는 자기베어링 제어용 ATmega128 원보드 컨트롤러이다. ⑥은 시스템 전원공급용 DC전원 공급 장치이다. ⑦은 실험 모니터링 및 데이터 수집용 노트북 PC이다.

2.2 ATmega128 원보드 컨트롤러

ATmega128 원보드 컨트롤러는 프로그램 메모리와 내부 데이터 메모리를 독립적으로 액세스하는 하버드 구조(Harvard architecture)와 파이프라인 처리 방식을 기반으로 하는 RISC(Reduced Instruction Set Computer)기술을 적용함으로써 매우 빠른 명령처리 속도를 자랑한다. 또한 플래시 메모리 기술을 접목하여 칩 내에 프로그램 코드용 플래시 메모리를 내장하고 여기에 사용자 프로그램을 다운로드할 수 있는 ISP(In System Programming) 방식을 적용하여 개발환경이 편리한 이점이 있다.

ATmega128은 8비트 마이크로 컨트롤러로써 16MHz에서 16 MIPS의 명령처리 속도를 갖고 있다.



- ① Magnetic bearing and induction motor
- ② Sensor amplifier
- ③ Current amplifier
- ④ Oscilloscope
- ⑤ ATmega128 controller
- ⑥ DC power source
- ⑦ Notebook PC

Fig. 1 Experimental apparatus

32개의 범용 레지스터를 가지며 128 KB의 프로그램용 플래시 메모리를 가지고 있고, 4 KB의 데이터 저장용 EEPROM을 갖고 있다. 6개의 8비트 병렬 I/O 포트 및 1개의 5비트 I/O 포트를, 칩 내부에 8채널 10비트 A/D 컨버터를 내장하고 있다.

본 연구에서는 2.56 V/10 bit의 분해능의 AD 입력 채널을 4개를 사용하여 위치센서로부터 위치정보를 얻게 하였고, DA 변환은 2.5V/8bit 분해능의 DA664 소자 2개를 이용하여 8개의 아날로그 전압 출력을 얻어 전자석 구동 전류 앰프(APEX사 PA12)로 전달되도록 설계하였다.

2.3 자기베어링

Fig. 2는 자기베어링 및 전동기의 전체 조립 단면도이다.

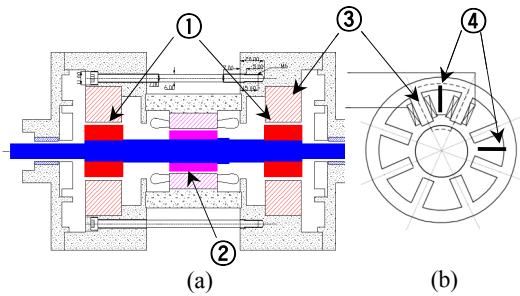


Fig. 2 The section of magnetic bearing & motor assembly

Fig. 2(a)에서와 같이 부상축에는 자기베어링의 회전자 코어(①) 및 3상 유도전동기의 농형 코어(②) 부분이 조립되어 있다. 부상축은 자기베어링의 전자석에 의하여 공극의 중앙인 0.2 mm (200/1000)로 부상한 상태에서 중앙부의 유도전동기에 의하여 회전하게 된다.

Fig. 2(b)는 자기베어링의 전자석 코일이 감긴 고정자 코어(③)와 위치센서(④)의 위치를 보여주고 있다. 전자석 코일은 양쪽 하우징 안에 조립되어 있고, 8개의 전자석이 서로 이웃하는 전자석과 짝을 이루어 4쌍이 상하좌우에 배치, 수직 및 수평방향으로 제어를 하게 된다. 위치센서는 양쪽 하우징 커버에 각각 12시 방향 및 3시 방향에 좌우 2개씩 좌우 모두 4개가 조립된다.

본 연구에 사용된 자기베어링의 각 계수 값은 Table 1과 같다.

Table 1 Parameter values of magnetic bearing

Parameter	Value	Unit
Acceleration of gravity : g	9.8	m/s ²
Magnetic permeability of air : μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	-
Relative permeability of silicon steel plate : μ_s	3.0×10^3	-
Mass of levitation object : m	1.3	kg
Resistance of coil : R_a	12.5	Ω
Sectional area of air gap : S	2.4×10^4	m ²
Gain of driving amp. : G_{amp}	1.0×10^2	-
Total air gap : x_T	4.0×10^{-4}	m
Number of turns : N	4.0×10^2	-
Length of magnetic path : ℓ_m	0.103	m
Inductance of coil : L_a	6.3×10^{-2}	H

2.4 위치센서

자기부상체와 전자석과의 간극을 계측하기 위해 사용한 위치센서는 취급이 용이하고 장치가 간단하며 저렴한 와전류형 센서로 Fig. 3과 같이 키엔스(Keyence)사의 와전류형 변위 센서를 사용하였다.



Fig. 3 The eddy current type displacement sensors and the sensor amplifier

3. 제어시스템의 구축

3.1 제어시스템의 블록선도

자기베어링 시스템의 블록선도는 Fig. 4와 같다. 그림에서 x_{rl} , x_{rr} 은 좌·우측 공극의 기준입력이고, x_l , x_r 은 좌·우측의 공극이다. 자기베어링 시스템은 크게 자기부상체(Levitation Object), 센서(Sensor), 제어기(Controller) 등 세 개의 서브시스템으로 구성되어 있다.

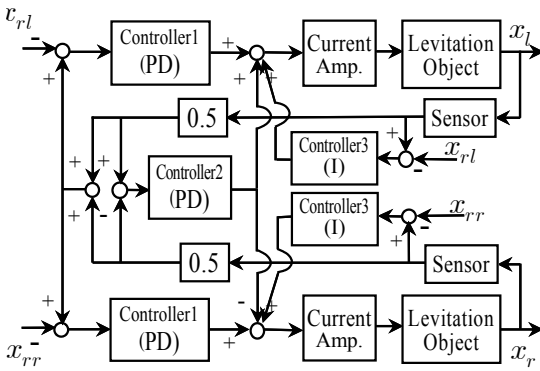


Fig. 4 Block diagram of magnetic bearing system

블록선도에는 세 개의 제어기가 있는데, 좌우측 PD제어기(Controller1)와 커플링 제어기(Controller2) 및 I제어기(Controller3)로 구성되어 있다. 강체인 부상축을 좌우에서 각각 제어함에 따라 좌우측의 자기 베어링은 서로 영향을 받게 되므로 좌우의 평균 위치값, 즉 중간 위치값(자기부상체의 기울기 값)을 제어출력에 반영하기 위한 것이 커플링 제어기이다.

3.2 비선형성을 고려한 시뮬레이션과 이산형 PID제어기

앞서 기술한 바와 같이 정⁹⁾은 비선형성을 고려한 시뮬레이션을 통하여 자기베어링 시스템에 요구되는 제어 성능을 만족하면서 ATmega128 원보드 컨트롤러로 수행 가능한 샘플링 타임으로 0.25 ms를 선정하였다. 또한, 시스템이 안정되고 최대한의 강인성을 확보할 수 있는 제어기의 제어게인을 반복적인 실험을 통하여 다음과 같이 선정하였다.

1) Controller1(PD) 제어게인 :

$$K_p = 2.0, K_d = 16.0$$

2) Controller2(PD) 제어게인 :

$$D_K_p = 1.0, D_K_d = 8.0$$

3) Controller3(I) 제어게인 : $K_i = 0.000244$

여기서, Controller3(I) 적분게인 K_i 는 좌측 혹은 우측의 전자석에 각각 두 개의 제어기가 연결되어 있는데 이들 내부의 적분게인을 영(zero)으로 하여 적분제어가 2회 중복되는 것을 1회로 하기 위한 게인이다.

4. 실험 및 결과

자기베어링 시스템의 제어 알고리즘 내에 포함된 제어칙 연산을 실시간으로 실험시켜본 결과 PID 제어에 소요된 연산시간은 0.903 ms이었다. 뿐만 아니라 4채널 AD 입력, 8채널 DA 출력이 필요하기 때문에 제어알고리즘을 실시간으로 실행 연산하여서는 만족할 만한 결과를 얻을 수 없게 된다.

본 연구에서는 PID제어에 필요한 실수연산을 미리 계산하여 Lookup Table로 변환, 프로그램 메모리에 2차원 배열로 저장하는 방법으로 연산시간을 0.182 ms로 획기적으로 줄여, 결국 샘플링 타임을 0.25 ms로 제어알고리즘을 구현할 수 있었다.

4.1 부상 실험

시뮬레이션 결과를 토대로 실제 제작한 자기베어링 시스템의 자기부상체를 정지 중 부상실험을

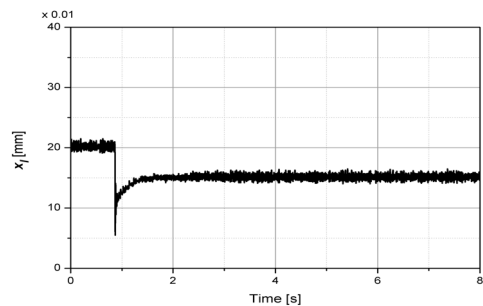


Fig. 5 Step down response (left)

하였다. Fig. 5, 6은 부상 안정 후, 스텝명령에 대한 좌우측 자기부상체의 추종성을 나타내고 있는데 각각 약 1 초 이내에서 위치명령을 추종하고 있다.

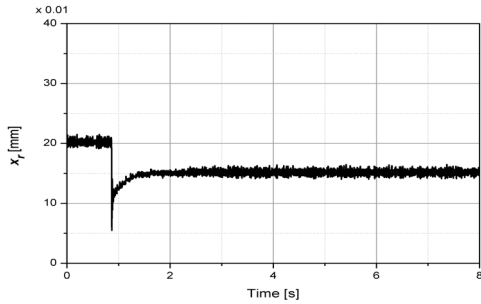


Fig. 6 Step down response (right)

Fig. 7 ~ Fig. 8은 자기부상체의 왼쪽 끝단에 외부로부터 임의 크기의 충격을 수직방향으로 주었을 때 외란제거 성능을 나타내고 있는데, 0.1 초 이내에서 안정되는 응답을 보여줬다.

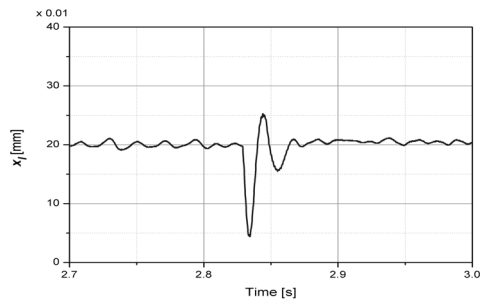


Fig. 7 Enlargement of disturbance rejection (left)

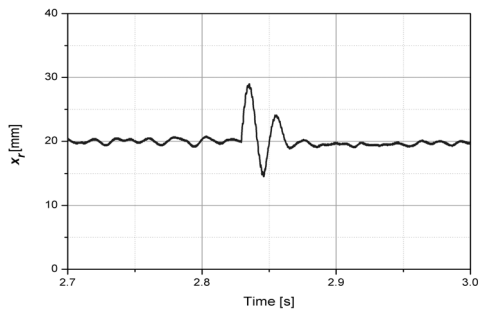


Fig. 8 Enlargement of disturbance rejection (right)

4.2 3상 유도전동기에 의한 회전 실험

Fig. 9 ~ Fig. 12는 3상 유도전동기로 자기부상체를 1,750 rpm으로 회전시켰을 때 자기부상체의 거동을 나타내고 있다. 0.10 mm보다 작은 진폭으로 비교적 안정되게 회전하고 있음을 확인했다.

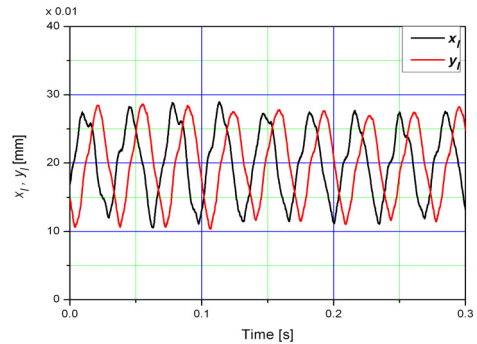


Fig. 9 Time response of rotor by elec. motor driving (left)

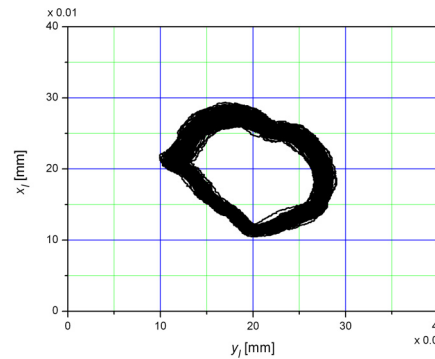


Fig. 10 Orbit plot by elec. motor driving (left)

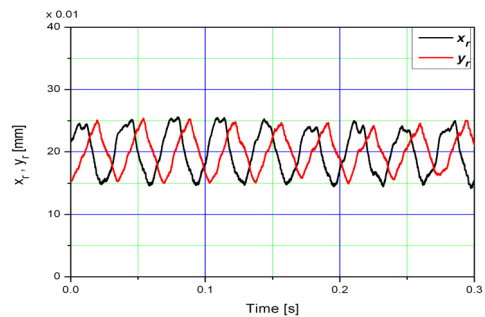


Fig. 11 Time response of rotor by elec. motor driving (right)

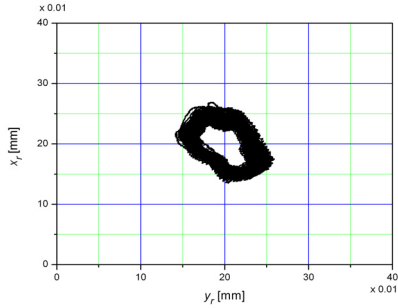


Fig. 12 Orbit plot by elec. motor driving (right)

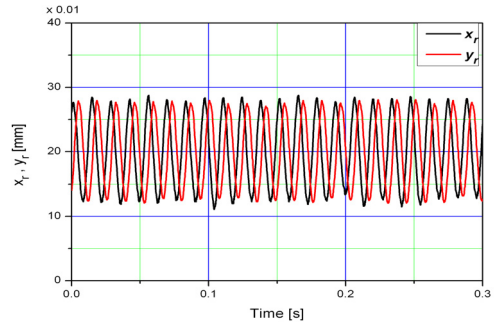


Fig. 15 Time response of rotor by air turbine driving (right)

4.3 에어터빈에 의한 회전 실험

자기부상체의 왼쪽 끝단에 간이한 블레이드를 부착하고 노즐을 통해 압축공기를 분사시켜 자기부상체를 회전시켰다. Fig. 13 ~ Fig. 16은 자기부상체가 4,380 rpm으로 회전할 때 왼쪽 및 오른쪽 끝단에서의 자기부상체 거동을 나타내고 있다. 우측의 경우, 0.08 mm보다 작은 진폭으로 안정하게 회전하고 있음을 확인하였다.

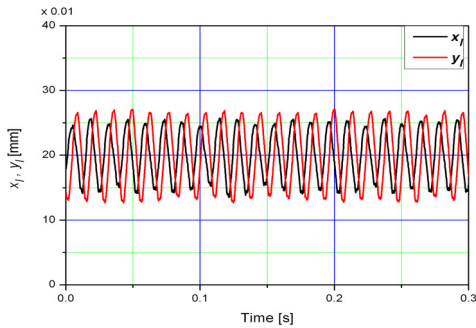


Fig. 13 Time response of rotor by air turbine driving (left)

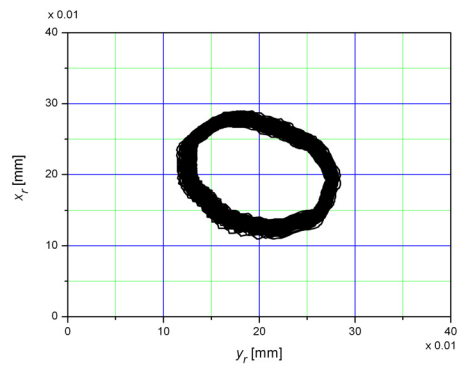


Fig. 16 Orbit plot by air turbine driving (right)

회전을 상승시켜 4,752 rpm으로 회전시켰을 경우 Fig. 17 ~ Fig. 20과 같이 자기부상체의 진폭이 0.13 mm를 상회하게 되어, 기계베어링과의 간극의 여유가 상하 각각 0.07 mm밖에 없어 자기부상체와 기계베어링과의 접촉이 염려되었다.

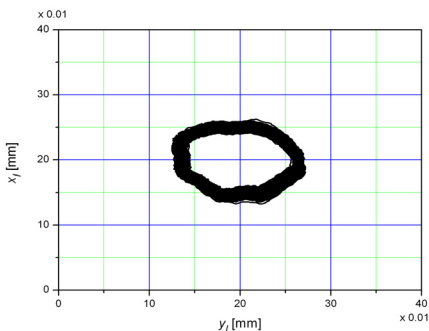


Fig. 14 Orbit plot by air turbine driving (Left)

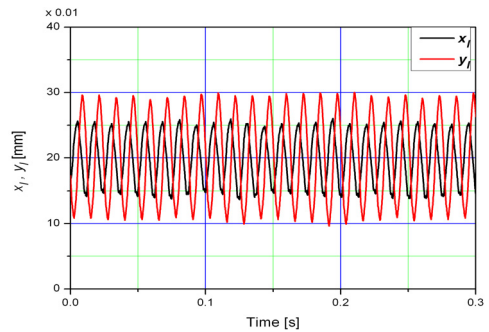


Fig. 17 Time response of rotor by air turbine driving (left)

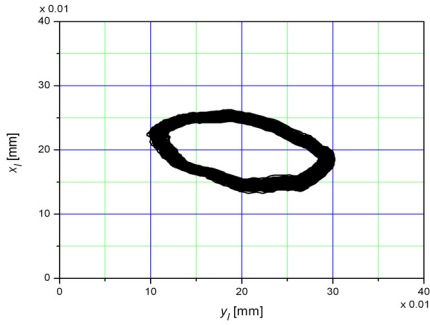


Fig. 18 Orbit plot by air turbine driving (left)

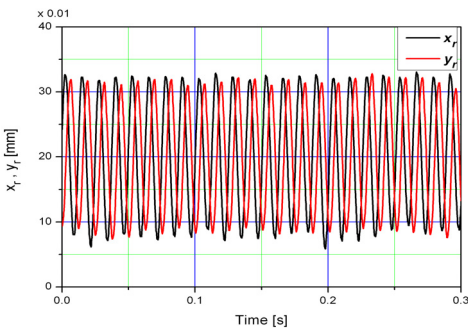


Fig. 19 Time response of rotor by air turbine driving (right)

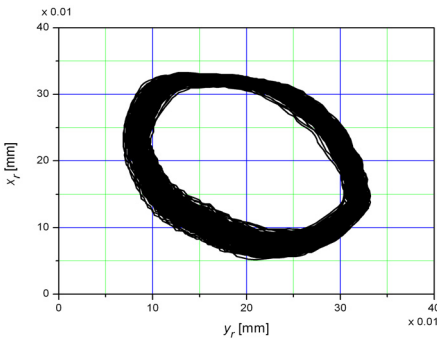


Fig. 20 Orbit plot by air turbine driving (right)

4.4 제어시스템의 페루프 주파수 특성

Fig. 21은 자기부상체를 실제 회전시키면서 회전수 변동에 따른 좌측의 상하진폭을 측정 한 것 (●, Amplitude[mm]로 표기)과, 정지 중 주기함수의 사인과 전압을 PID 제어기의 좌측 상부출력에 외란으로 중첩시켜 자기베어링에 인가하고, 회

전축의 상하진폭을 변위센서로 계측하여 페루프계의 주파수응답(■, Magnitude[dB]로 표기)을 비교 표시한 것이다. 사인과 전압은 100 mV를 1 Hz ~ 약 300 Hz 까지 차례로 인가하였다. Amplitude[mm]는 부상체를 회전 가능할 때까지 회전수를 증가시키며 좌측 상하진폭의 값을 그대로 표기한 것이다. 이를 살펴볼 때 100 Hz, 628 rad에서 진폭이 최대가 되고 이후 진폭이 감소할 것으로 예측된다. 이 위치를 회전수로 환산하면 6,000 rpm에 해당된다. 실제 에어터빈에 의한 구동 시 자기부상체의 진동을 계측하여 푸리에 변환(fourier transform)한 결과 108 Hz, 6,480 rpm에서 공진점이 나타났다.

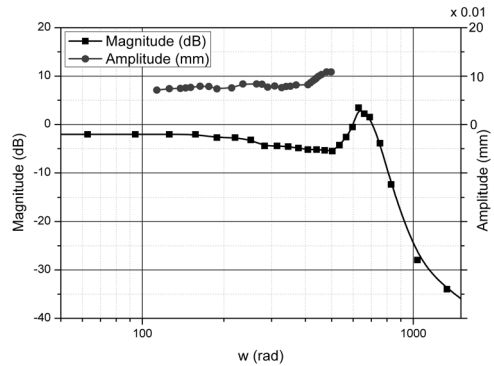


Fig. 21 Frequency response of closed loop

5. 결론

Lookup table 기법과 Shift 연산을 이용하여 저가 보급형 ATmega128 원보드 컨트롤러를 사용하여 자기베어링 시스템을 부상시켜 양호한 제어 성능을 확인할 수 있었다. 또한, 자기베어링 시스템의 부상체 회전실험에서도 4극 3상 유도전동기로는 1,750 rpm, 에어터빈을 이용해서는 4,752 rpm 까지 양호하게 제어 성능을 유지하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

추후 과제로, DSP(Digital Signal Processor)와 같은 고성능 프로세서를 사용하여 고속에서 안정적인 회전을 하는 자기 베어링 시스템을 구축코자 한다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비 (2013년: C-D-2013-0425)에 의해 연구되었음

Vol. 25, No. 12, pp. 82-88.

9. K. G. Choung, 2012, "A study on the Construction of the Magnetic Bearing Control System by ATmega 128", The Graduate School of Pukyong National University, pp. 73-108.

References

1. C. H. Kim and J. H. Yang, 1997, "A Study on the Gap Estimation Circuit Design of the Magnetic Levitation System", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 144-153.
2. C. H. Kim and J. H. Yang, 1998, "A Study on the Sensorless Realization of Magnetic Levitation System by Two-Degree-of-freedom Control Method", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 888-893.
3. H. H. Jeong, Y. B. Kim and J. H. Yang, 2009, "The Identification of the Magnetic Bearing control System's Parameters using RCGA", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 13, No. 4, pp. 68-73.
4. J. H. Yang et al., 2005, "Automatic Control", DooYangSa, Seoul, pp. 394-397.
5. D. J. Lee, J. H. Hong and J. K. Park, 2001, "Basic and Application for the Magnetic Bearing", SigmaPress, Seoul, pp. 25-35.
6. G. H. Choi, J. H. Yang and K. G. Choung, 2012, "Mathematical Modeling about Magnetic Attractive Force of Magnetic Bearing", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 644-684.
7. K. G. Choung, J. H. Yang and C. H. Kim, 2011, "Multivariable Control System Design for Magnetic Bearing", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 78-85.
8. Min Sig Kang, 2008, "Sliding Model Control for an Active Magnetic Bearing System", Journal of the Korean Society for Precision Engineering,