

# 능동형 자기베어링 전용제어기 설계에 관한 연구 A Study on Design of Exclusive Controller for Active Magnetic Bearing

\*#고석조<sup>1</sup>, 김지연<sup>2</sup>, 고희영<sup>3</sup>, 이영진<sup>3</sup>, 박정훈<sup>4</sup>

\*#S. J. Go(sjgo@dit.ac.kr)<sup>1</sup>, C. Y. Kim<sup>2</sup>, H. Y. Go<sup>3</sup>, Y. J. Lee<sup>3</sup>, J. H. Park<sup>4</sup>,

<sup>1</sup> 동의과학대학 컴퓨터응용기계계열, <sup>2</sup> 부산대학교 대학원 기계공학부, <sup>3</sup> ㈜오토파워, <sup>4</sup> 현대위아(주)

Key words : Active Magnetic Bearing, Controller Design, DSP Controller

## 1. 서론

기계식 베어링은 회전하는 물체와 고정 물체의 상대 운동을 점 혹은 선 접촉을 통해 마찰을 줄이고 윤활 보조제를 충전하여 회전 운동에 대한 운동 에너지를 최소화 하는 장치이다. 그러나 선 혹은 점 단위의 접촉 면적의 축소를 통해 마찰량은 줄일 수 있지만 접촉에 따른 근본적인 손실은 피할 수 없으며 사용 시간에 따른 피로 및 마모에 따라 장치의 손케 및 오염에 따른 마찰 증가 등이 유발되며 장치 교환이란 부수적 보수 작업으로 사용 연한이 한정된다. 이에 반해 자기 베어링은 기계적 접촉 없이 회전자를 전자 기력에 의해 부상하여 접촉에 의한 마찰 및 마모 없이 반영구적으로 사용 가능한 장점이 있어서, 윤활에 의한 오염이 없어야 하는 클린 룸, 우주선과 인공위성을 위한 결합 위치 제어, 에너지 저장 시스템 등의 고 효율 장치에서 적용되었고, 현재는 터보 기구류나 가공기 고속 장치 등에 적용되어 점차 활용 범위가 넓어지고 있다.

자기 베어링의 기본 구동 방식은 흡인식 부상방식을 사용하고 있다. 이는 본질적인 불안정 시스템으로 부상된 상태를 안정적으로 유지하기 위해서는 자기 베어링 부상을 위한 강인 제어가 필수적이다. 이러한 자기 베어링에 대한 강인 제어기법은 상당기간 연구가 진행되었다[1-3]. 그리고 실제 시스템 적용을 위한 디지털 신호 처리 기법 및 시스템 구축에 대한 연구도 진행되었다[4]. T. Shimomachi의 연구에서는 제어 알고리즘의 운용을 DSP에서 처리하였으나 이는 제어 알고리즘의 실험적 구현에 맞추어진 연구관점의 연구였다. 실제 현장에 활용을 위한 전용 제어기를 제작함에 있어서는 제어입력인 전류의 선형적이며 빠른 응답 특성도 중요한 성능 요인이 된다.

본 논문에서는 능동형 자기베어링의 전용 제어기 개발에서 자기 베어링의 산업 활용도를 높일 수 있도록 DSP에 의한 고속 처리 성능을 기반으로 선형특성을 가지도록 설계 되었고, 이에 대한 성능 특성을 실험적으로 증명하고자 한다. 따라서 2 장에서는 전용 제어기 개발에서 요구되는 자기 베어링 시스템 제어기 설계 과정에 나타나는 이론적인 성능 지수인 시간 지연 즉 응답 특성을 이론적으로 고찰하고 설명한다. 3 장에서는 본 연구에서 개발한 DSP VC33을 적용한 제어 장치에 대한 응답 특성 시험을 통해 성능 평가를 수행하고자 한다.

## 2. 이론적 해석

Fig. 1 과 같이 능동형 자기 베어링은 자기력의 흡인식 방식을 통해 유도 자기력의 유실을 줄이는 구동 방식을 사용한다[5]. 흡인식 방식을 사용함에 따라 Fig. 2 와 같이 자기력에 대해 평형점(equivalent point)을 벗어나면 불안정한 시스템이 되는 제어의 어려움이 있다. 이를 수학적으로 해석해 보면 Fig. 3 과 같은 전자석 시스템의 평형점 근방에서 구동 전류와 간극을 선형화하기 위해 힘에 대한 식(1)을 평형점에서의 기본 구동 전류( $I_{b1}, I_{b2}$ )와 간격( $g_0$ )를 기준으로 발생 간극( $cq$ ) 및 추가 입력 전류( $i$ )에 대한 결과식이 식(2)와 같고 각각의 항은 식(3)과 같이 유도가 된다.

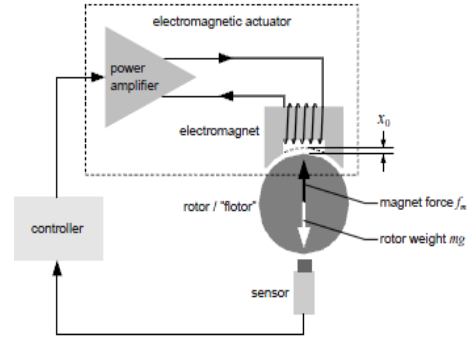


Fig. 1 The basic magnetic bearing control loop and its elements

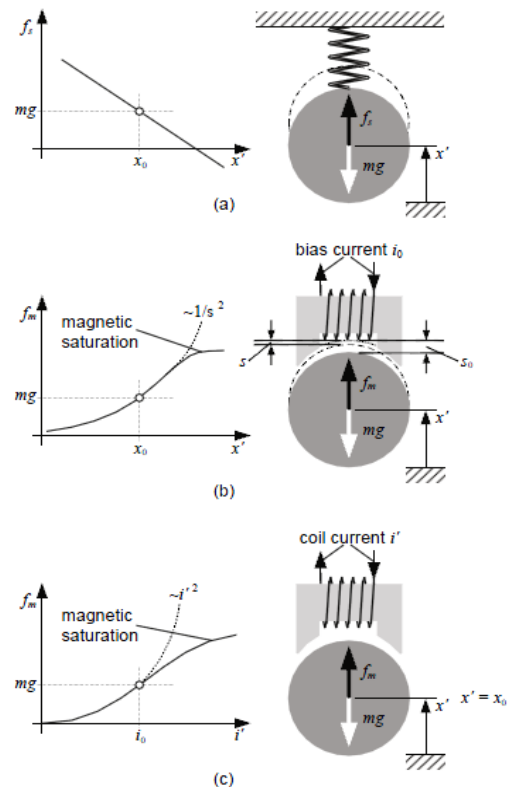


Fig. 2 Comparison of forces  
(a) mechanical spring  
(b) electromagnet(constant bias current  $i'=i_0$ )  
(c) Electromagnet (constant air gap  $x'=x_0$ )

$$F = \frac{\mu_0 N^2 I^2 A}{g_2} \quad (1)$$

$$F = \frac{\mu_0 AN^2}{(g_0 - cq)^2} (I_{b1} + i)^2 - \frac{\mu_0 AN^2}{(g_0 + cq)^2} (I_{b2} - i)^2 \quad (2)$$

$$= f_0 + K_i i(t) + K_q q(t)$$

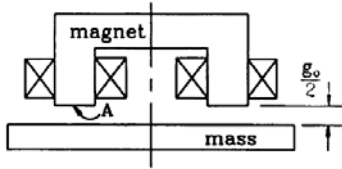


Fig. 3 Magnetic Force system

$$K_i = \frac{2\mu_0 AN^2}{g_0^2} (I_{b1} + I_{b2}) \quad K_q = \frac{2\mu_0 AN^2 c}{g_0^3} (I_{b1}^2 + I_{b2}^2)$$

$$f_0 = \frac{\mu_0 AN^2}{g_0^2} (I_{b1}^2 - I_{b2}^2) \quad (3)$$

식에서 N 은 코일의 감은 횟수, A 는 자극의 단면적,  $\mu_0$  는 투자율을 나타내며 g 는 가공극을 나타낸다. 이러한 힘에 대해 2 차 시스템으로 로터와 전자석 시스템의 동적 오픈 루프(open loop) 전달함수를 구하면 식(4)와 같이 된다.

$$Y = \frac{K_i}{I (ms^2 - K_q)} = \frac{K_i/m}{(s - \sqrt{K_q/m})(s + \sqrt{K_q/m})} \quad (4)$$

일반적으로 제어의 편의성을 위해 입력 전원을 전압으로 주고 구동 시스템의 전류는 전용 제어기의 전류제어를 통해 서보 시스템을 구성하는 방식을 사용하고 있다[6]. 이에 따른 전달함수에서는 전압에 대한 서보 시스템의 전달함수가 부차적으로 추가된다. 이것은 입력원의 차이이고 만약 서보 시스템 즉 전용제어기의 전류 응답이 늦어지면 원천적으로 시스템에 시간지연  $\tau$  가 들어가는 형태가 되며 식 (4)의 전달함수가 식 (5)와 같이 시간 지연을 가진 전달함수로 바뀌고 시스템의 극점에서 영점으로 발생하게 된다. 특히 시간지연의 크기가 크면 클수록 극점에 가까이 접근하며 제어시스템에 문제를 일으키게 된다.

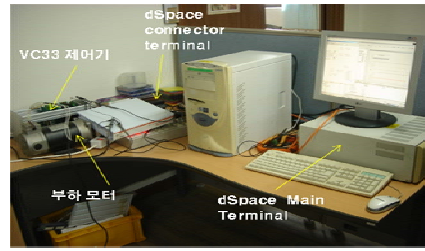
$$\frac{Y}{I} = \frac{K_i e^{-\tau s}}{(ms^2 - K_q)} = \frac{K_i e^{-\tau s} / m}{(s - \sqrt{K_q/m})(s + \sqrt{K_q/m})} \quad (5)$$

### 3. 시스템 설계

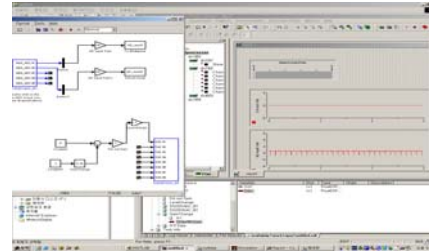
본 연구에서 개발한 전용 제어기는 고속 처리용 TI 사 마이크로프로세서인 DSP VC33 을 사용하고 구동 입력 전류를 내장전류센서를 사용하여 모니터링과 동시에 PWM 전류제어를 고속으로 처리하도록 하였으며 기본적인 제원은 Table. 1 과 같다. 자기 베어링의 구현에 앞서 본 연구에서 설계 제작한 제어기의 성능 평가를 위해 Fig. 4 와 같이 PC 에서 dSpace 를 이용하여 입력력을 모니터링 하며 제어기 성능을 평가하였다. 전류 제어의 구동 시험은 마찰점도가 높은 모터를 사용하여 구동 전류를 선형적으로 발생해 보았다.

Table 1. Specifications of controller

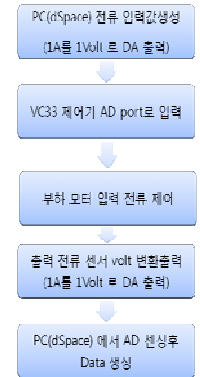
	Specification
Main Processor	DSP VC33
Sampling	100us
Current Out port	10-port
Current Out Max	10A
Input Port	8-port
Input range	±10V
A/D,D/A	A/D



(a) Test



(b) dSpace test program



(c) procedure

Fig. 4 Experimental tests

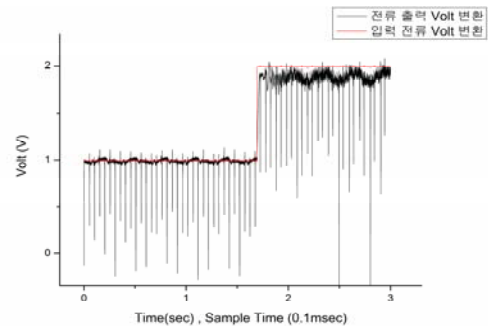


Fig. 5 Experimental test result

Fig. 5 는 시험 결과로써 2 msec 이내의 응답특성을 가짐을 실험적으로 확인 할 수 있었다.

### 4. 결론

본 논문에서는 자기 베어링 설계 제작에 있어서 제어기의 성능 변수가 되는 제어기 시스템 응답성을 개선하기 위해 고속 연산 처리가 가능한 DSP 마이크로프로세서를 주 프로세서로 장착하고 이에 대한 성능 평가의 이론적인 근거를 분석해 보았으며, 설계 제작된 제어 시스템의 실험적 평가를 해 보았다.

### 참고문헌

1. 이대중, 박장환, 유정용, "자기 베어링의 가변구조 제어", 1996 KACC, 419-422, 1996.
2. 백승헌, " 자기베어링의 비례-미분제어에 대한 연구," 석사학위논문, 서울대학교, 1990.
3. 이교일, 한동철, 백승헌, 이정훈, 장인배, "자기부상 베어링의 제어에 대한 연구", 1990 한국자동제어학술대회, 805-810, 1990.
4. T. Shimomachi, S. Fukata, Y. Kouya, T. Ishimatsu, "Vibration Control of Active Magnetic Bearing Systems Using Digital Signal Processor", 1990 KACC, 1178-1183, 1990.
5. Gerhard. S., Eric. H., " Magnetic Bearings; Theory, design, and Application to Rotating Machinery", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
6. 김승중, "능동 자기 베어링 지지 정밀 회전축계 해석", 석사학위논문, 한국과학기술원, 1991.