

50,000rpm급 초고속 소형 정밀모터용 능동 자기베어링 시스템 제어 및 설계

論 文
55B-8-4

Control and Design of 50,000rpm Class Active Magnetic Bearing System for High Speed-Small Size Precision Motor

姜 圭 洪[†]
(Gyu-Hong Kang)

Abstract - This paper deal with control and design of 50,000rpm class Active Magnetic Bearing(AMB) system for high speed precision motor. In the design of AMB system, the design parameters adopted high robust rotor shaft, Active Magnetic Bearing, sensor and control system. In the design of Magnetic Bearing, 2-D Finite Element Method(FEM) is used and transfer matrix method is using for rotor dynamics. The control accuracy of high speed AMB system is demonstrated by experimentations.

Key Words : Active Magnetic Bearing, AMB, Control System

1. 서 론

회전기계의 초소형화 및 고효율을 위해서 초정밀, 초고속 회전기 개발에 대한 요구가 해를 거듭할수록 가속화되는 기술추세에 있다. 초고속 회전기술은 고속 공작기계 스피들을 비롯한 고진공 펌프 및 각종 터빈 압축기 등에 실용화 시키는 단계일 뿐만 아니라 점차 고정밀, 고속화되어가는 추세에 있다. 그러나 현재의 초고속 회전기술은 대부분이 중대형 기기의 기술개발이 주를 이루고 있으며 실험실적인 기초연구로서 부분적으로 수행되고 있다. 따라서 최근의 소형 고풍력화 요구에 따른 많은 고속용 소형모터에 대한 연구는 수행되지 못하고 있는 실정이다.[1][2]

이와 같은 이유는 모터의 초고속화를 위해 지금까지 사용해 왔던 베어링들이 어느 정도 한계에 이르렀고, 이들은 모터의 소음과 발열문제, 수명 저하를 야기하고 있다. 즉, 현재 사용되고 있는 대부분의 고속모터는 축이 되는 부분에 불과 윤활유를 적절히 사용해 마찰을 줄이면서 고속 회전이 가능하도록 만들어졌으나, 더욱더 고속화되는 모터는 이러한 베어링의 적용이 이제는 소음과 발열문제를 해결 할 수 없다.[1]-[3]

이에 대한 해결 방법으로 자기 베어링(Magnetic Bearing)은 전자석의 흡인력, 반발력을 이용하여 회전체를 공기 중에 부상함으로써 마찰을 없애고, 고속회전을 가능하게 하며, 회전축을 정 위치에 지지하게 하는 방식의 베어링으로 종래의 구름 베어링과 비교하여 기계적 접촉부를 가지지 않기 때문에 고속, 저 토크, 저소음, 긴 수명의 특징을 가지는 장점이 있다. 따라서 회전기계의 향후의 핵심기술로서 소형 초고속

의 시스템에 기계적 베어링이 아닌 전자력을 이용한 비 접촉 방식의 제어형 첨단 Active베어링의 개발이 모터의 초고속화를 통한 신 개념 및 신기능의 액츄에이터 모듈 개발을 가능케 할 것이다.[4]

본 논문에서는 50,000rpm급 능동 자기베어링(Active Magnetic Bearing, AMB) 시스템의 설계 파라미터를 도출하여 설계 및 제작하였다. AMB 시스템의 설계 파라미터로 고강성 회전체, Active 자기베어링 및 제어시스템으로 구분하여 각각을 설계하였다. 회전체는 Transfer Matrix Method를 이용하여 회전축의 Rotor Dynamics를 통해 설계하였으며 2차원 유한요소법을 이용하여 자기베어링의 해석 및 설계를 수행하였다. 본 논문에서 설계한 AMB 시스템의 제어특성 및 회전정도를 실험을 통하여 입증하였다.

2. AMB 시스템 구조설계

본 논문에서 AMB 시스템의 설계는 구조 설계와 제어 시스템 설계로 구분된다. 구조설계에서는 초고속 전동기에 적합한 BLDC Motor의 설계와 더불어 회전체 구조 설계 및 자기 베어링 설계로 구성되며 제어 시스템 설계에는 전동기 제어 및 회전체 제어 및 센서회로 설계로 구성되어진다. AMB 시스템 구성도를 그림 1에 나타내었다.

본 장에서는 AMB 시스템의 구조설계에서 회전체 설계 및 자기베어링 설계의 순서로 제시하였다.

2.1 50,000rpm급 슬롯리스형 BLDC Motor

초고속 소형 정밀모터는 제어 특성 및 반복정밀도와 빠른 응답속도가 요구되므로 저 코깅 토크(Cogging torque), 저 관성이 가져야한다. 따라서 슬롯리스형 BLDC 전동기는 제어 성능에 악영향을 주는 코깅 토크를 근본적으로 가지고 있지 않고 자기적 공극의 증가에 의해 인덕턴스가 슬롯형 전동기에 비해 적어 전기적으로 저 관성의 특성을 갖는다.[5]

[†] 교신저자, 正會員 : (주) 모터넷인터내셔널 研究所長
E-mail : ipmsm@korea.com

接受日字 : 2006年 6月 16日
最終完了 : 2006年 6月 27日

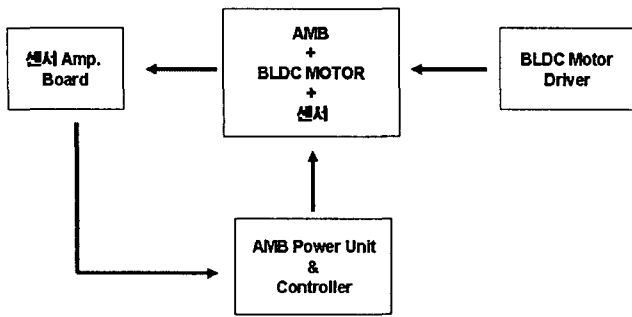


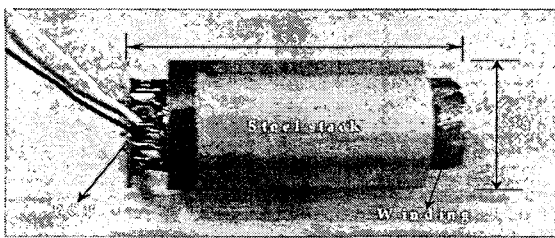
그림 1 AMB 시스템 구성도
Fig. 1 The construction of AMB system

따라서, 본 논문에서 초고속 전기구동 시스템에서의 구동용 모터로 슬롯리스형 BLDC 모터를 적용하였으며 공간고조파 이론을 도입하여 전동기 설계 및 특성해석을 수행하였으며, 구동모터의 제어는 Sensorless 제어가 적용되었다.

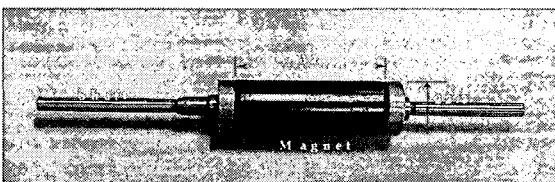
50,000rpm급 AMB 시스템에 적용된 슬롯리스형 전동기의 세부 사양은 직경을 40[mm]로 하여, 모터의 정격출력을 600[W], 무부하 속도를 50,000[rpm], Stall torque를 5,000[mNm]로 하여 설계하였다. 설계된 모터의 제원은 표 1에, 제작 사진을 그림 2에 나타내었다.

표 1 모터 제원
Table 1 Specification of motor

Rated power	600 [W]	Resistance	0.13 [Ohm]
Voltage	60 [V]	Rated current	10 [A]
Stall torque	5,000 [mNm]	Rated torque	100 [mNm]
speed/torque	10.0 [rpm/mNm]	Torque constant	10.8 [mNm/A]
Inductance	0.03 [nH]	Rotor Inertia	85 [gcm ²]



(a) Side view



(b) Rotor (Magnet & Shaft)

그림 2 슬롯리스형 BLDC motor
Fig. 2 Slotless type BLDC motor

2.2 회전체 구조설계

Magnet에 의해 부상되는 초고속 소형 정밀모터를 개발하

기 위하여 Slotless BLDC 모터 및 능동 자기베어링 (Active Magnetic Bearing, AMB)의 회전체 설계를 시행하였다.

일반적으로 AMB시스템은 구동모터, Radial AMB, Axial AMB, Back-up Bearing과 케이스로 구성되며, 제어시스템은 모터 제어기와 AMB제어기로 구성된다.

자기베어링의 설계 시의 고려사항으로는 정, 동적 하중지지 능력, 지지 강성, 대역폭, 임계속도 및 고속에서의 안정성, 하드웨어의 효율적인 제작, 비상시를 대비한 비상 베어링, 등이 있으며, 모터의 전자기적 특성과 제어기 및 전체 시스템을 고려한 설계가 이뤄져야만 한다.

AMB 시스템의 회전체 설계를 위한 초기제원을 표 2에 나타내었으며 초기 설계된 회전축의 Rotor Dynamics의 해석을 위한 모델을 그림 3에 나타내었다. Rotor Dynamics의 해석에는 Transfer Matrix Method를 사용하였다.

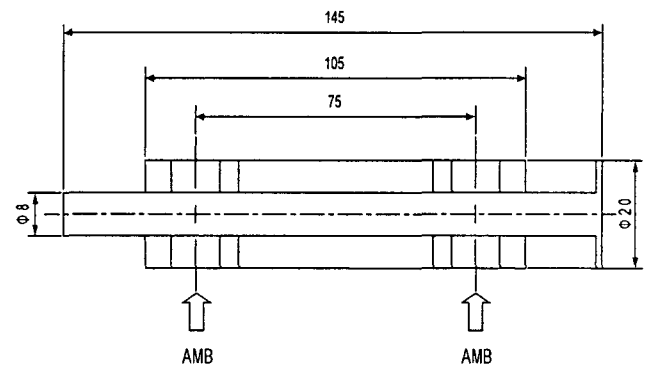


그림 3 회전자 동적 모델
Fig. 3 Dynamic model of rotor

표 2 AMB shaft 설계 제원
Table 2 Design parameters of AMB shaft

Item	Values [Unit]
Diameter	8 mm-20 [mm]
Length	145 [mm]
Span of bearing	75 [mm]
Mass	0.284 [kg]
Polar inertial	0.136x10 ⁻⁴ [kgm ²]
Stiffness of AMB	100,000 [N/m]
Rating speed	600-800 [rps]

AMB의 강성은 일반적으로 강성이 큰 것이 유리하지만 시스템의 크기, 무게 및 AMB에서의 자기포화(Magnetic saturation) 등에 의해 무한정 크게 할 수 없다. 따라서 지지강성의 크기에 따라 축계의 고유진동수가 작동속도범위에 들지 않도록 축계의 정, 동특성 해석을 통한 강성의 결정이 요구된다.

해석에 사용된 강성은 단순스프링으로 지지된 것으로 모델링 하였으며, Non-rotating shaft에 대한 Modal analysis 결과, 133.3[Hz], 140.8 [Hz], 896.1 [Hz]에서 각각 Mode 1, 2, 3이 나타났으며 그 형상은 그림 4와 같다. 3개의 Critical speed인 133.3 [rps], 143.3 [rps] and 952.8 [rps]로부터 Core Shaft의 직경이 10[mm]라면, 첫 번째 Bending mode 주파수가 1396[Hz]

가 됨을 알 수 있었다. 이는 첫 번째 Bending mode가 840~890[Hz] (50,000rpm)보다 높아야하는 조건을 만족함을 확인하였다.

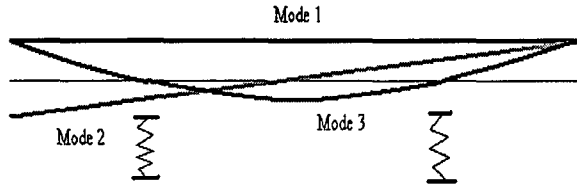


그림 4 모드 형상
Fig. 4 Mode shapes

AMB의 축계(Shaft)는 초기설계에서 보완이 요구되는 Axial AMB에 의한 Thrust force를 보완하기 위하여 그림 5에서와 같이 세부 수정설계를 수행하였다.

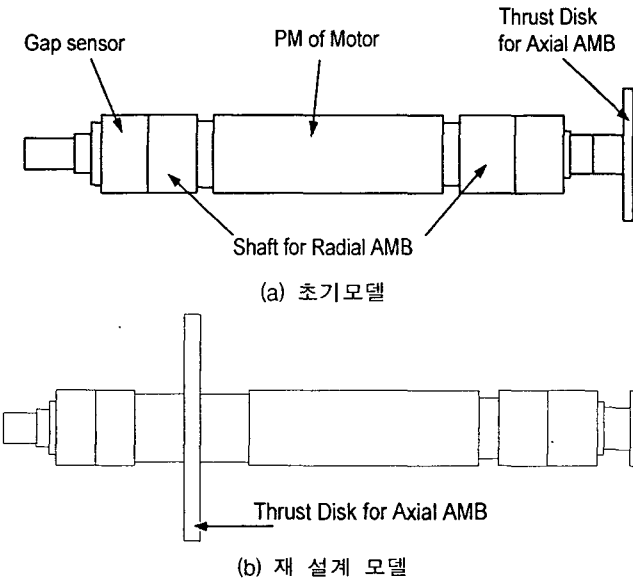


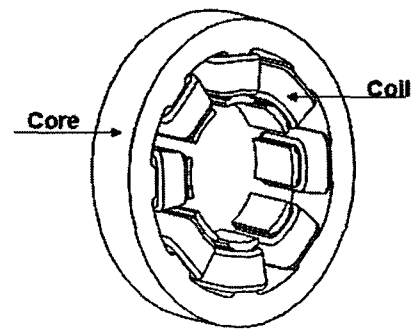
그림 5 AMB 시스템의 회전체 shaft
Fig. 5 Rotor shaft of AMB system

그림 5에서 보는 바와 같이 기존의 Axial AMB를 위한 Thrust Disk를 중간 부로 이동시켜 Force를 증가시키고, 축계의 고유진동수를 고려하여 Shaft의 두께를 기존의 8[mm]에서 10[mm]로 설계 하였다.

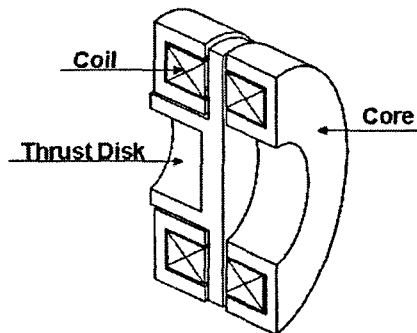
2.2 AMB 시스템을 위한 자기베어링 설계

본 AMB시스템은 반경방향 하중을 위한 Radial AMB가 구동모터의 앞, 뒤에 배치되고, 축방향 하중을 지지하는 Axial AMB가 뒷부분에 위치하는 구조를 가지고 있다. 따라서 각 하중의 지지능력을 고려하여 AMB를 설계하였다.

Radial AMB는 그림 6 (a)에서 보는 바와 같이 8극으로 구성되며 Axial AMB는 그림 6 (b)와 같이 설계되었다. 고속에서의 손실 저감을 위해 적층구조를 취하였으며, 적층을 위한 규소강판은 0.2[mm]를 사용하였다. 각각에 대한 사양은 표 3과 표 4에 나타나있다.



(a) Radial AMB.



(b) Axial AMB

그림 6 능동 자기베어링 구조
Fig. 6 The structure of AMB

표 3 Radial 자기베어링의 전기적 제원

Table 3 Electrical Parameters of the Radial AMB

Spec.oftheRadialAMB			
Turn number	50	Gap	0.25[mm]
Space factor	0.6	Coil inductance	1.0[mH]
Diameter of the wire	0.5[mm]	Inner diameter	20.5[mm]
Magnet pole area	32[mm ²]	Outer diameter	42.0[mm]
Coil resistance	0.2[Ω]	Length	8.0[mm]

표 4 Axial 자기베어링의 전기적 제원

Table 4 Electrical Parameters of the axial AMB

Spec.oftheAxialAMB			
Turn number	15	Mean distance	0.2[mm]
Space factor	0.6	Mean coil inductance	0.5[mH]
Wire diameter	0.5[mm]	Inner diameter	8.6[mm]
Magnet pole area	100[mm ²]	Outer diameter	20[mm]
Coil resistance	0.1[Ω]	Length	3.2[mm]

설계된 Radial 및 Axial AMB의 제어를 위한 발생 힘의 특성을 검증하기 위하여, 유한요소법을 이용한 전자계 해석을 수행하였다. Radial AMB는 그림 7 (a)과 같이 2차원 해석이 수행되었고, Axial AMB는 축대칭 3차원 해석이 수행되었다.

해석을 위한 Radial AMB의 Coil Turn수는 50[Turn], 전류는 1[A]로 하였으며, Axial AMB는 15[Turn], 1[A]로 하여 해석이 수행되었으며, Radial AMB는 Shaft를 부상하는데 요

구되는 부상력과 Axial AMB의 Push force의 해석결과를 표 5에 나타내었다.

그림 7의 자속분포에 대한 해석결과로부터 설계된 Radial AMB의 동작을 확인하였으며, 또한 치에서의 최대 자속밀도가 1.2[T]로 비교적 코어를 효과적으로 이용하고 있음을 확인하였을 뿐만 아니라 초기 설계한 값과도 비교적 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

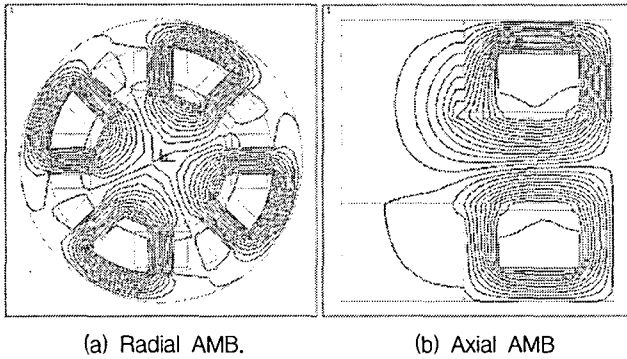


그림 7 AMB의 자속분포도

Fig. 7 Magnetic flux distribution of AMB

표 5 전자계 해석결과

Table 5 Analysis results of electromagnetic field

Analysis Results of the Radial AMB	
Magnetic force on the armature by two coils (N-S poles)	186.5196 [N/m]
Copper loss	111.12 [W/m]
Iron loss	0.03282 [W/m]
Multiply by the length (8mm)	1.49216 [N]
Multiply by the length (14mm)	2.61128 [N]
Analysis Results of the Axial AMB	
Magnetic force on the armature by the coil above	0.10200 [N]
Magnetic force on the armature by the coil below	0.091492 [N]
Copper loss	0.10452 [W]
Iron loss	0.4949E-06 [W]

3. AMB 제어시스템 설계

Shaft와 AMB의 공극 측정을 위한 센서 및 전력변환회로 및 제어를 포함한 AMB 제어시스템의 설계를 시행하였다. 그림 8은 제어시스템의 블록도이다.

AMB를 제어하기 위해서는 기준위치로부터 축의 상하변위를 변위센서로 측정하여 이를 Feedback하여 제어기로 보내게 되고, 제어기로부터의 제어명령에 따라 전력증폭기(Power Amplifier)에서 AMB의 권선에 전류를 흘림으로서 자기력을 변화시켜 회전축을 제어하게 된다. 본 논문에서는 Rotor Shaft의 변위를 측정하기 위해 Eddy current type Sensor를 적용하였으며 사양은 표 6과 같다.

공극 센서는 총 8개로 구성하여 AMB shaft의 상부와 하부에 각각 4개의 센서를 설치하였으며 센서 출력전압의 한 쌍으로 구성된 센서 1-1'의 출력전압의 차를 DSP에 입력하여 위치제어를 수행하고 있다. 센서의 구성도를 그림 9에 나타내었다.

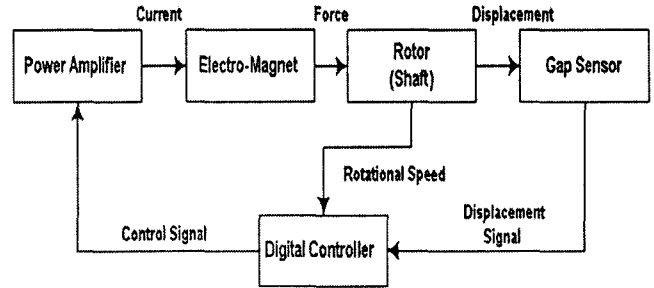


그림 8 AMB의 디지털 제어시스템 구조

Fig. 8 Digital Controller System Structure of AMB

표 6 센서 요구 사양

Table 6 Sensor argument.

Items	Requirement
Type	Eddy current displacement sensor
Resolving power	>1.0[μm](20[mv/ μm])
Linear range	> ± 0.1 [%]
Temperature stability	> ± 0.004 [%]/ \rightarrow
Long-term stabilization	> ± 0.3 [%]
Measure bandwidth	>10[kHz]

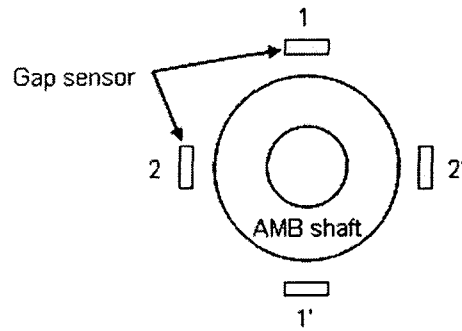


그림 9 AMB shaft 공극 센서 구성도

Fig. 9 Gap sensor construction of AMB shaft

특히, 제어시스템의 설계에 있어 AMB가 고속회전을 특성으로 하고 있으므로 질량 불균형 등으로 발생할 수 있는 외란을 효과적으로 제어하기 위해서는 AMB의 winding에 따른 인덕턴스 성분에 의해서 발생하는 대역폭 및 외란 극복을 위한 전력증폭기의 최대전압의 산정 등이 매우 중요하다.

제어기의 신호에 따라 결정된 전압을 인가하는 전력증폭기의 설계 요구사항은 표 7과 같으며, 전력증폭기는 제어기의 신호에 따라 이에 비례하는 전류를 AMB의 권선에 인가하여 위치제어를 수행할 수 있어야 한다.

표 7 전력증폭기 요구사항

Table 7 Power Amplify argument

Items	Requirement
Type	MPW(Minimum Pulse Width)amplify
Power supply input voltage	DC 50[V]
MAX output current	3[A]
MAX output power	1.5[KVA]
Channel	10
Efficiency	>90[%]
Switch frequency	>25[kHz]

또한, 제어기는 AMB의 회전성능을 결정하는 중요한 요소로서 근본적으로 제어의 안정성이 요구되며, AMB의 다자유도에 대한 효과적인 제어알고리즘의 적용이 요구된다. 본 기술개발에서는 사용의 편리성 및 향후의 모터와의 통합제어, 다중 시스템의 제어를 위해 연속계인 실제시스템에 불연속계인 디지털 제어기를 적용하였으며, 그에 따른 DSP 및 시스템의 구현이 적용되었다.

설계된 제어기의 블록도는 그림 10과 같으며, 그림에서 보는 바와 같이 Gap Sensor로부터 입력된 Rotor의 변위는 DSP에 입력되어 제어알고리즘에 따라 계산된 값이 D/A를 통하여 Power Amp.로 출력케 된다. 이때, Watch dog은 DSP의 Fault를 감지하여 자동으로 DSP를 Reboot하게 된다.

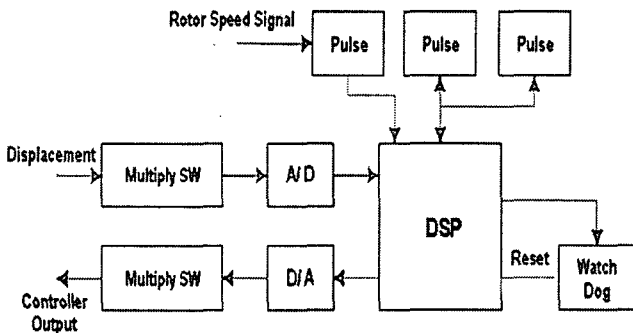
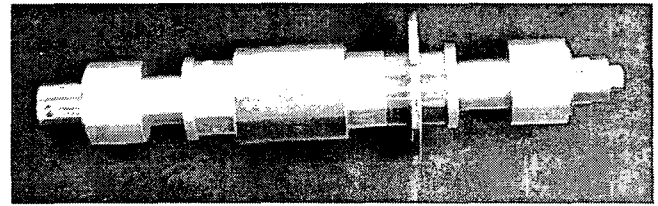


그림 10 DSP 제어기 블록도
Fig. 10 DSP digital controller structure

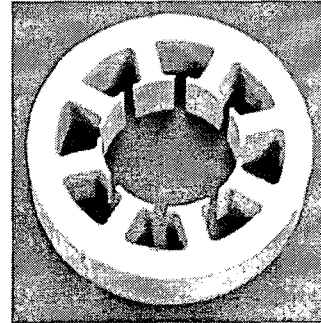
4. AMB 시스템 제어특성 실험

본 논문에서 설계한 AMB 시스템의 회전체 Rotor shaft와 Radial과 Axial 마그네틱 베어링은 그림 11, AMB 시스템의 제작 사진과 모터 드라이버는 그림 12와 13에 나타내었다.

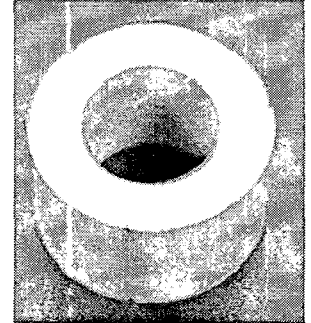
AMB 시스템의 제어특성을 평가하기 위한 시험 장치를 그림 14에 나타내었으며 8개의 센서로 구성된 AMB 시스템의 상단부 센서를 그림 15에 나타내었다.



(a) AMB rotor shaft



(b) radial 자기베어링



(c) Axial 자기베어링

그림 11 회전체 및 자기베어링
Fig. 11 Rotor and Magnetic Bearing

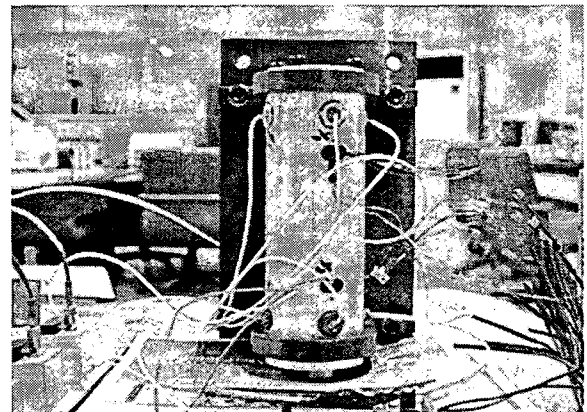


그림 12 제작된 AMB 시스템
Fig. 12 Manufactured AMB system

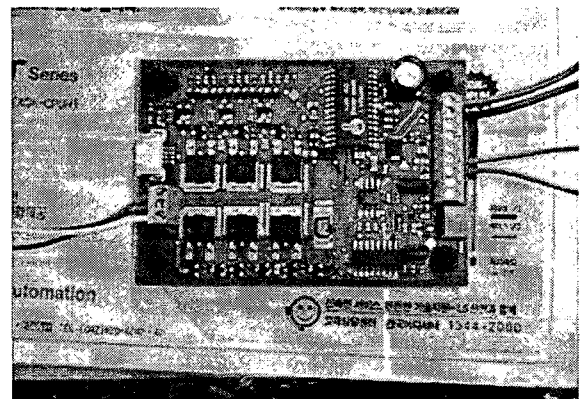


그림 13 모터 구동회로
Fig. 13 Motor Driver

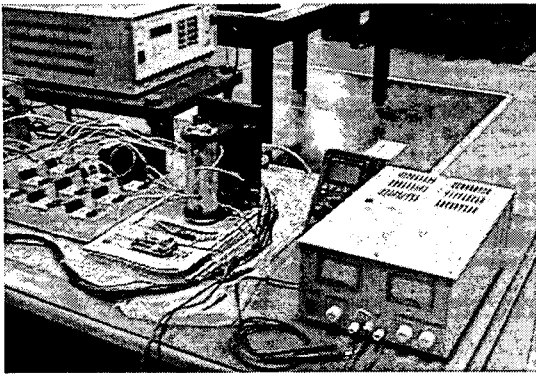


그림 14 AMB 시스템 시험 장치
Fig. 14 Experimental installation of AMB system

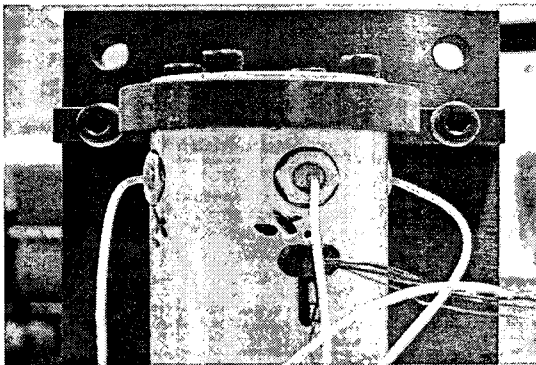


그림 15 AMB 시스템 센서
Fig. 15 Sensor installation of AMB system

AMB 구동을 하지 않은 Ball Bearing 상태에서 속도 변화에 따른 BLDC Motor의 전류 및 Gap Sensor의 출력 전압 파형을 그림 16에 나타내었다. AMB 시스템이 정상적으로 동작할 때의 센서 Amp.의 출력 전압범위는 10배 증폭하여 -2[V] ~ -10[V]로 Gap Sensor의 동작 테스트를 위해 정지 시와 Ball bearing 구동 시 센서의 출력 파형을 그림 17에 나타내었다. Ball bearing 구동 시 약 9300rpm에서 두 센서의 변위차에 의한 출력전압은 최대 3.96[V]로 19.8[μ m] 정도의 회전체 변위가 발생하고 있다.

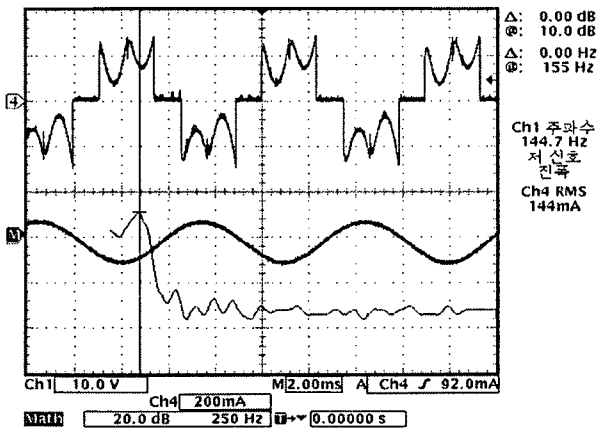
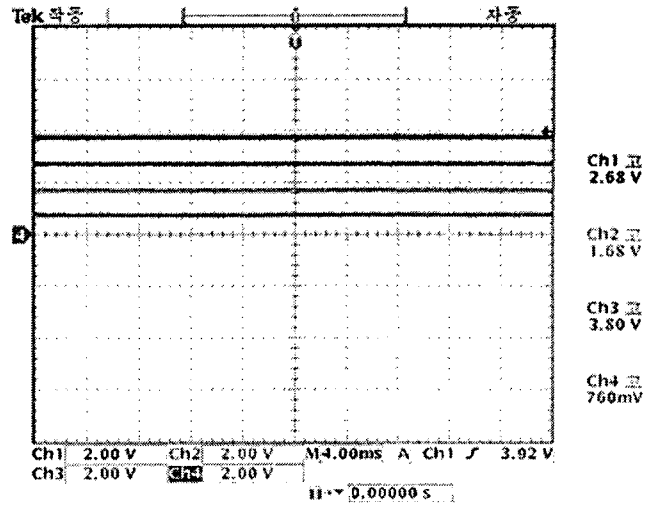
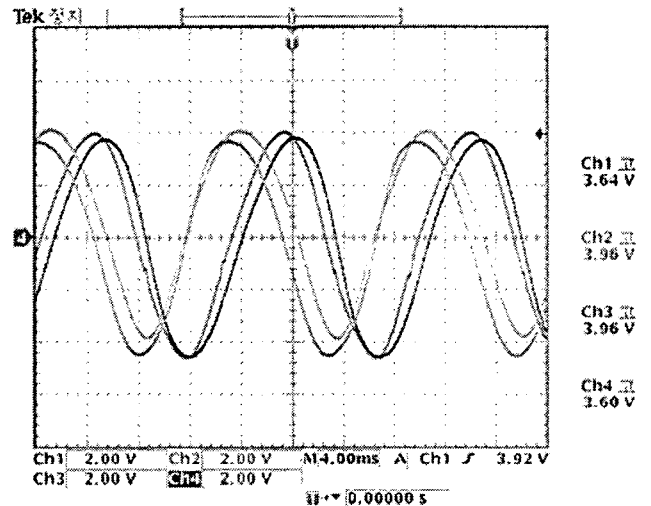


그림 16 Ball 베어링 운전시의 Motor 전류 파형(9300rpm)
Fig. 16 Motor current waveform by driving to ball bearing



(a) 정지 상태

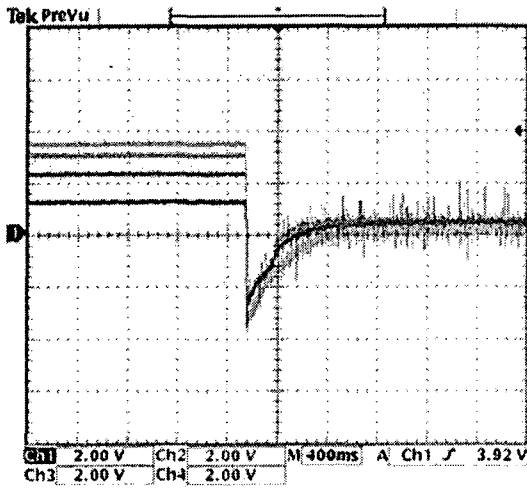


(b) Ball Bearing 구동 시

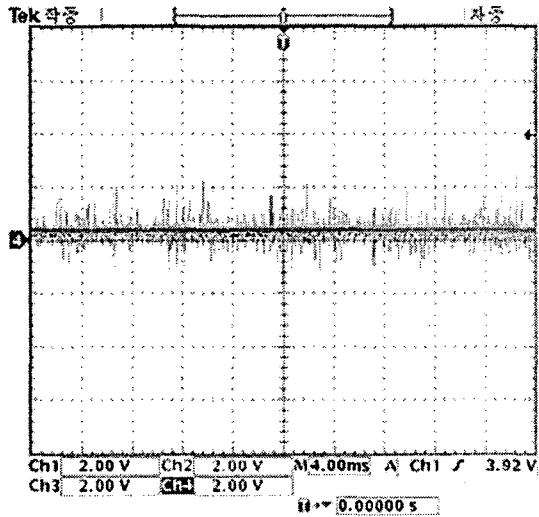
그림 17 Ball 베어링 운전시의 센서 파형
Fig. 17 Sensor output waveform by driving to ball bearing

AMB 시스템을 구동 했을 때 각각의 센서 출력 파형을 그림 18에 나타내었다. 그림 18 (a)는 AMB 시스템이 구동 시작했을 때의 상태이며, 시스템 구동 시 Gap Sensor의 출력 전위 값이 최대 2.44[V]로 자기베어링의 전자력에 의해 Rotor shaft가 AMB 시스템 중심에 12.2[μ m] 정도의 편차를 갖고 위치하고 있음을 알 수 있다. AMB 시스템 구동시의 rotor shaft의 초기위치는 Ball bearing 구동시의 편차보다 적어 현재 초기위치 제어가 잘되고 있음을 알 수 있다.

AMB 시스템 구동시 BLDC Motor의 회전 속도에 따른 AMB 센서 출력파형을 그림 19에 나타내었다. 2,700[rpm]에서는 센서 출력 전압이 최대 3.88[V]로 제어 정도가 19.4[μ m] 이고 9,000[rpm]에서는 2.56[V]로 12.8[μ m], 21,000[rpm]에서는 1.8[V]로 9[μ m], 30,000[rpm]에서는 1.76[V]로 8.8[μ m]의 제어 정도를 얻어 본 논문에서 설계한 AMB 시스템은 고속으로 갈수록 더욱 높은 제어정도를 얻어 매우 안정적으로 구동됨을 실험을 통해 입증하였다.

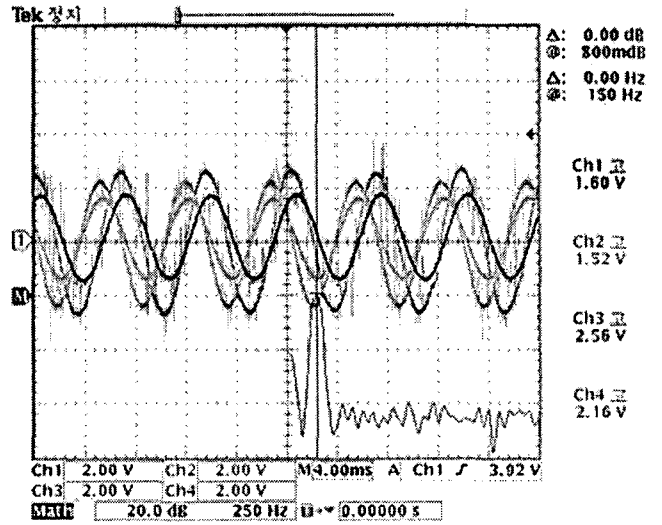


(a) AMB 구동 시작 시점

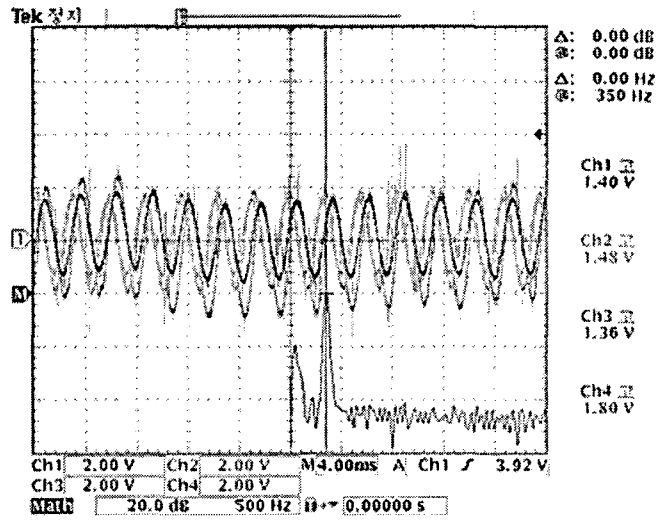


(b) AMB 구동 시 정지 상태

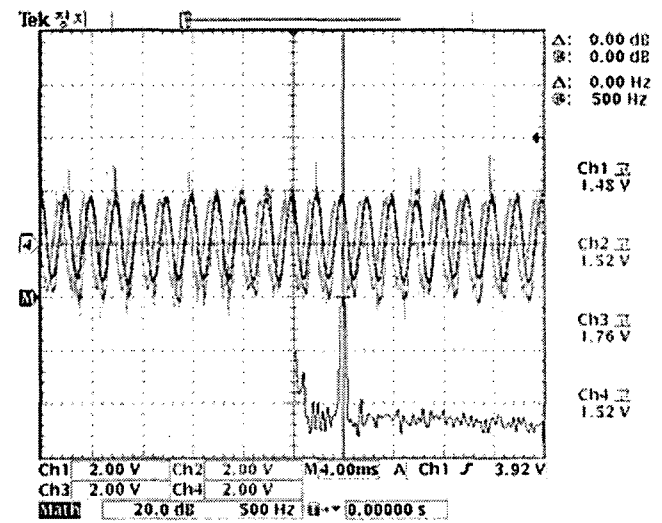
그림 18 AMB 시스템 구동 시 센서 출력파형
Fig. 18 Sensor output waveform by driving to AMB system



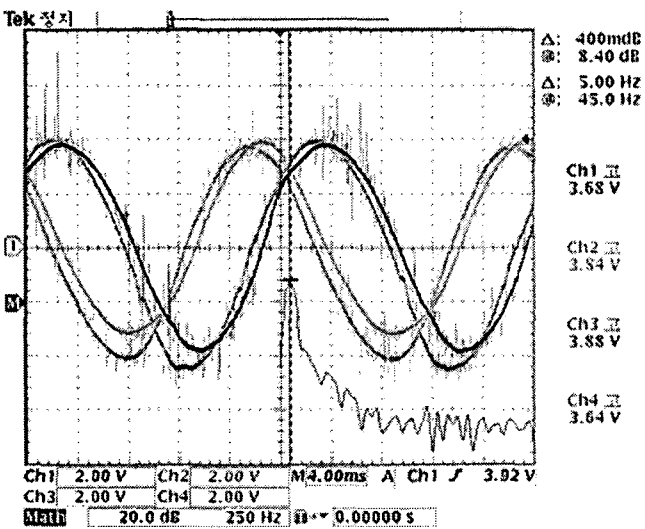
(a) 9,000 rpm



(b) 21,000 rpm



(c) 30,000 rpm



(a) 2,700 rpm

그림 19 속도에 따른 AMB 시스템 센서 출력
Fig. 19 Sensor output waveform of AMB system by speed

5. 결 론

본 논문에서는 50,000rpm급 초고속 능동 자기베어링 (AMB) 시스템의 구조 및 제어 설계를 수행하여 실험으로 성능을 평가하였다. AMB 시스템의 구조 설계에서는 초고속 회전을 위한 제어 파라미터를 도출하여 회전체 Rotor shaft 구조 설계와 Radial 및 Axial 베어링 설계를 통해 고속 운전에서의 강성을 확보하였다. 또한 본 논문에서 설계 및 제작한 AMB 시스템의 제어 정도를 저속에서 고속 영역에 이르기까지 기계적인 Ball bearing 이상의 제어 정도를 실험을 통해 입증하였다. 본 논문의 연구결과를 토대로 하여 AMB Rotor-dynamic stiffness 뿐만 아니라, 외란에 따른 제어특성 분석 및 강성제어 알고리즘의 개발을 통하여 100,000rpm급의 초고속 시스템 연구는 다음 연구로 삼는다.

참 고 문 헌

- [1] Pichot M.A. Driga M.D., "Loss reduction strategies in design of magnetic bearing actuators for vehicle applications", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, Issue 1, Part 2, pp. 492~496, Jan. 2005.
- [2] Min Sig Kang, Woo Hyun Yoon, "Acceleration feedforward control in active magnetic bearing system subject to base motion by filtered-X LMS algorithm", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol 14, Issue 1, pp. 134~140, Jan. 2006.
- [3] Zong Ming, Liu Yuhang, Shen Jixiu and Wang Fengxiang "Force Analysis for Hybrid Radial Magnetic Bearing Biased by Permanent Magnet", ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on vol. 3, pp 1834~1837, Sept. 2005
- [4] M.D Noh, Seong-Rak Cho, Jin-Ho Kyung, Seung-Kook Ro and Jong-Kweon Park "Design and implementation of a fault-tolerant magnetic bearing system for urbo-molecular vacuum pump", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 10, Issue 6, pp. 626~631, Dec. 2005

- [5] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong and Gyu-Tak Kim "Design and Analysis of slotless type Permanent Magnet Linear Brushless Motor by using Equivalent Magnetizing Current", IEEE Transactions on Industry Application, vol. 37, No. 5, pp.1241~1247 Issue 6, pp. 626~631, S

감사의 글

본 연구는 산업자원부 국제협력기술개발사업 지원에 의한 것입니다.

저 자 소 개



강 규 홍 (姜圭洪)

1967년 11월 5일생. 1992년 창원대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~1998년 LG전자(주) 주임연구원. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2001~2004년 창원대 메카트로닉스공학부 BK계약 교수. 2005~현재 (주)모터넷인터내셔널 연구소장
 Tel : 032-621-2829
 Fax : 032-621-2805
 E-mail : ipmsm@korea.com