

# 자기베어링과 동위한 축전센서의 설계 및 성능 평가

## The Design and Performance Verification of Collocated Capacitance Sensor for Magnetic Bearing

류선중\*, 신동원\*\*, 김종원\*\*\*

\*서울대학교 대학원 기계설계학과

\*\*서울대학교 대학원 기계설계학과/ERC-ACI

\*\*\*서울대학교 기계설계학과

### ABSTRACT

The design and performance verification of collocated capacitance sensor system for magnetic bearing is presented. Noncollocation between actuators and sensors may cause unstable rotor behavior. The capacitance sensor is not affected by magnetic field. PCB type capacitance sensor is installed between magnetic bearing poles. so, collocation of sensors and actuators can be achieved. Experiment of sensor's static and dynamic characteristics is conducted. Modeling of the rotor system supported by magnetic bearing is made. And performance comparison between simulation and experiment is showed.

### 1. 서론

자기베어링은 전자기력을 능동적으로 제어함으로써 회전축을 물리적인 접촉 없이 지지할 수 있는 기계요소이다. 기존의 구름 접촉식 베어링에 비해 윤활, 시일, 마모 등의 문제가 없고, 특히 축 진동을 능동적으로 억제할 수 있는 장점을 가지고 있어서 고속의 회전축을 지지할 필요가 있는 곳에서 응용 범위를 가지고 있다.

전자기적 견인력을 이용하는 자기베어링 시스템은 음의 강성을 갖게 되어 불안정하다. 따라서 로터의 변위를 측정하여 궤환제어함으로써 폐루프 시스템을 안정화 시켜야 한다. 로터의 변위를 측정하기 위해 기존에 사용되던 와전류형(eddy current) 변위센서는 자기베어링이 발생시키는 자기장의 영향을 받기 때문에 자기베어링으로부터 일정한 거리를 두고 설치하여야 하여야 한다.[1] 이 경우 변위 측정 위치와 자기력 작동점 위치가 불일치하게 되는데 Maslen 등에 의하면 연성축계의 경우 고속 회전시 불안정성을 유발할 수 있다.[2][3] 이러한 문제점은 자기장의 영향을 받지 않는 축전센서(capacitance sensor)를 사용하여 변위 측정 위치와 자기력 작동점 위치를 일치시킴으로써 해결할 수 있다. Chapman은 공기 베어링 지지 초정밀 주축의

회전 오차를 측정하기 위해 축전센서를 이용한 범위 측정 시스템을 개발하였다.[4] 장인배는 이를 기본으로 하여 자기베어링의 제어에 축전센서를 이용하였다.[5] Salazar 등은 유도기기의 회전자를 지지하기 위한 자기베어링에 축전센서를 이용하였다.[6] 그러나 이상의 경우는 센서 구조상의 문제로 인하여 범위 측정 위치와 자기력 작동점 위치가 일치하지 않는 문제가 있다.

본 연구는 자기베어링과 일체로 장착할 수 있는 동위형 축전센서(collocated capacitance sensor) 시스템을 개발하고 이를 자기베어링의 제어에 응용하는 것을 목적으로 한다. 연구의 내용은 다음과 같다. 첫째, PCB 기판을 소재로 동위형 축전센서를 구현하여 자기베어링과 일체로 장착한다. 둘째, 센서를 구동하기 위한 회로는 Chapman 모델을 기본으로 제작하고 센서의 선형성을 항상시키기 위한 정전류 회로를 추가한다. 세째, 제작된 센서의 성능은 범위 민감도 실험과 주파수 특성 실험을 통하여 확인한다. 네째, 동위형 축전센서가 장착된 자기베어링 지지 로터계를 모델링한다. 다섯째, 시뮬레이션 결과와 자기베어링 제어실험을 통해 얻은 결과를 비교하여 동위형 축전센서가 장착된 자기베어링 시스템의 성능을 확인한다.

## 2. 축전센서의 설계 및 실험

### 2.1 동위형 축전센서의 설계

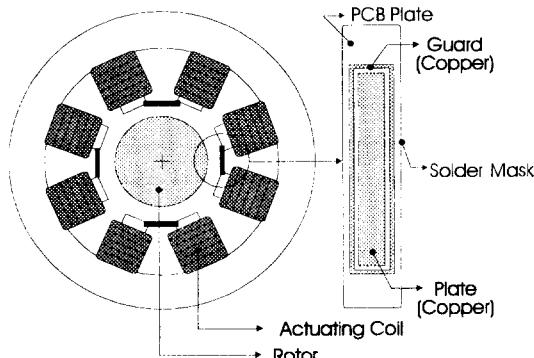


Fig. 1 Collocated configuration of capacitance sensor

축전센서는 자기베어링이 형성하는 자기장의 영향을 받지 않음으로 자기베어링과 동위하여 설치할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 자기베어링의 자극 사이에 센서가 설치될 수 있도록 센서 형상을 설계하였다. 센서는 애폴시 기판(FR4 PCB)을 소재로 하여 원하는 형상을 쉽게 제작할 수 있도록 하였으며, 변위를 측정하기 위한 전하가 충방전 되는 부분인 센서판(plate)과 전기장의 왜곡을 막기 위해 가드(guard)는 애폴시 기판 위에 두께 0.1mm의 구리막을 입혀 제작한다. 로터의 표면으로부터 기준간격(0.325mm)의 거리에 위치한 경우 센서의 전기용량은 2.4pF이다. 그리고 센서의 표면은 자기베어링의 제어실험 중 일어날 수 있는 센서면과 로터의 통전을 막기 위해 절연재(solder mask)로 코팅 처리하였다. Fig. 2는 제작된 동위형 축전센서의 상세 도면이다.

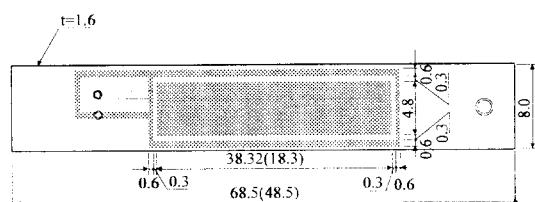


Fig. 2 Draft of collocated capacitance sensor

### 2.2 센서 구동 회로

축전센서에서 센서의 전위  $V$ 와 측정 변위  $x$  간에는 다음과 같은 선형적 관계가 존재한다.

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{\int_0^T idt}{\kappa \epsilon_0 A} x \quad (1)$$

자기베어링 시스템에서는 센서면과 회전체면이 축전기의 구실을 하게 되며 계속적으로 변화하는 변위를 측정하기 위해 일정 시간 간격  $T$ 로 일정량의 전하량  $Q$ 를 센서에 충방전 시킴으로써 그 때의 센서면의 전위를 측정하여 센서면과 회전체 사이의 거리를 측정한다. Fig. 3은 이와 같은 센서의 전기적 작용을 구동하는 전기 회로의 간략도이다.

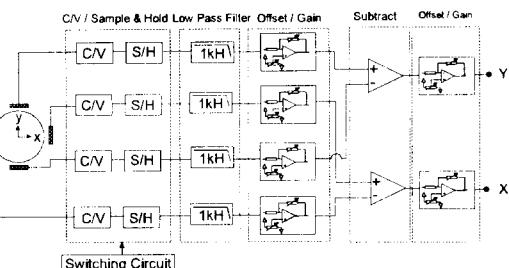


Fig. 3 Schematics of sensor driving circuit

Fig. 4는 C/V & S/H(capacitance to voltage & sample and hold)회로의 상세도이다. C/V & S/H 회로는 일정한 시간 간격으로 센서에 전하를 충방전 시키고 그와 동기하여 충전의 끝 부분에서 센서의 전압을 추출하여 한 충방전 주기 동안 유지 시키는 작용을 한다. 이와 같은 센서의 주기적인 작동은 Fig. 5의 스위칭 신호에 의해 구동 되는데 여기서  $V_{CD}$ 는 충방전 스위칭 신호를  $V_{SH}$ 는 추출과 유지 스위칭 신호를 그리고  $V_p$ 는 이때 센서에 인가되는 전압의 파형을 나타낸다. C/V 회로에서 센서에 충방전 전류를 공급하는 전원부는 Fig. 4에서와 같이 정진류 회로로 구성하여 센서의 선형성을 향상 시킨다. C/V & S/H 회로에서 만들어지는 변위 신호에는 충방전 주기  $T$ 에 해당하는 스위칭 노이즈가 포함되어 있으므로 차단주파수 1kHz인 저역통과 필터를 사용하여 노이즈를 제거한다. 네 개의 각 센서는 회로의 소자들이 모두 동일할 수 없고 또한 센서의 면적과 표면조도 등도 가공상의 오차로 인하여 동일할 수 없다. 따라서 이를 전기적으로 보정

하기 위하여 각 센서 신호의 오프셋과 개인을 조정할 수 있도록 한다. 한편, 센서의 출력 전압은 온도, 습도 및 공급전원 접지 등의 변화에 따라 변화한다 이를 막기 위하여 한 방향에 대하여 마주보는 두 개의 센서를 설치하여 각각의 센서 신호를 차동증폭하여 외부 환경 변화에 따른 센서 출력 전압의 변화를 최소화 하도록 한다. 그리고 최종단의 차동증폭된 변위 신호의 오프셋과 개인도 조정할 수 있도록 하였다.

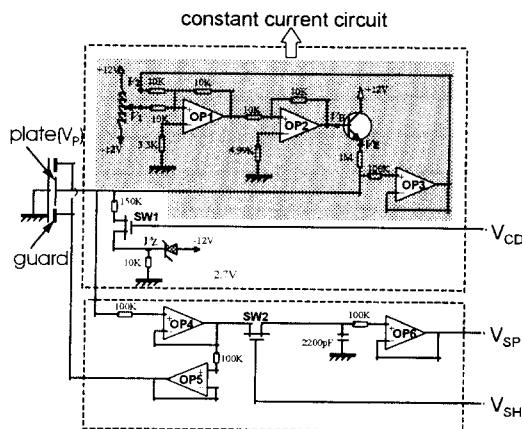


Fig. 4 Details of C/V & S/H circuit

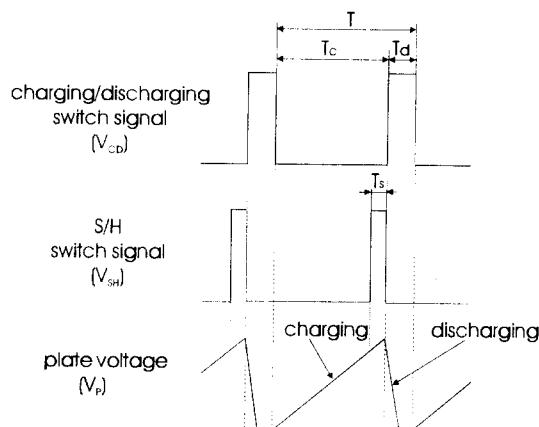
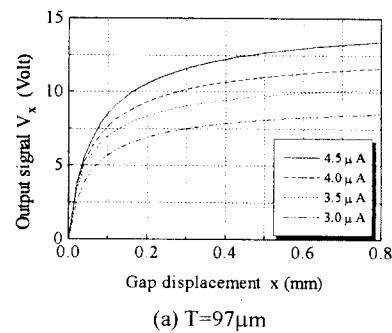


Fig. 5 Switching signal and sensor voltage

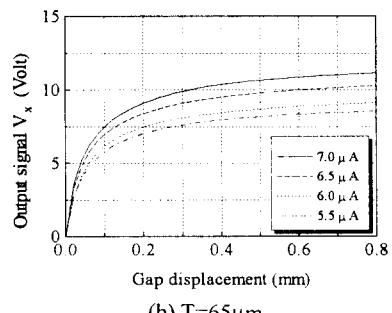
### 2.3 변위 민감도

제작된 축전센서의 변위 민감도 즉, 측정거리 변화에 따른 센서 출력 전압의 변화를 측정하기 위한 실험 장치를 제작하였다. 분해능  $10\mu\text{m}$ 인 마이크로미터 눈금이 장착된 이송 기구 위에 센서를

장착하여 센서판과 로터 사이의 거리 변화에 따른 출력 전압을 측정하였다. Fig. 6은 측정된 센서의 변위 민감도 결과이다. 충방전 주기  $T$ 를  $97$ ,  $65\mu\text{sec}$ 로 바꾸어 가면서 측정하였고 각각의 경우 충방전 전류를 바꾸어 가면서 센서의 변위 민감도를 측정하였다. 이 때  $T_s=440\text{nsec}$ ,  $T_d=15\text{nsec}$ 로 고정하였다. 실험 결과 축전센서의 변위 민감도는 충방전 주기가 길수록 그리고 충방전 전류가 많을수록 커짐을 확인하였다. Fig. 6와 같은 센서의 변위 민감도 자료는 자기베어링의 제어 실험시에 센서 출력 전압에 대한 실제 변위를 계산하는 보정표(look-up table)를 만드는데 사용한다.



(a)  $T=97\mu\text{m}$



(b)  $T=65\mu\text{m}$

Fig. 6 Displacement sensitivity of capacitance sensor

### 2.4 주파수 특성

제작된 축전센서의 주파수 특성 즉, 정현파의 변위 신호 입력에 대한 센서 출력 전압의 크기 감소와 위상지연을 측정하기 위하여 Fig. 7과 같은 장치를 설계하였다. 원주면의 8곳을  $0.2\text{mm}$ 씩 평평하게 가공한 로터를 축에 장착하여 축의 1회전당 8

개의 정현함수의 변위 신호를 얻을 수 있도록 하였다. 12,000rpm 까지 회전시켜 1.6kHz 까지의 정현파 변위 신호를 만들 수 있고 이때의 센서의 출력 전압의 크기와 위상을 측정하여 센서의 주파수 특성을 측정할 수 있다.

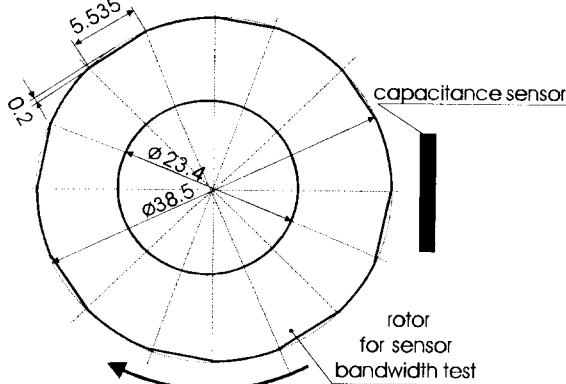


Fig. 7 Rotor for measurement of sensor's frequency characteristics

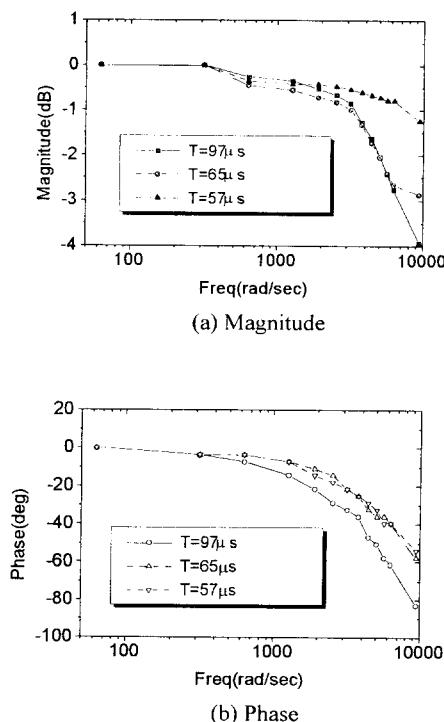


Fig. 8 Frequency characteristics of capacitance sensor

Fig. 8 은 센서의 주파수 특성 실험 결과이다. 실험

결과 축전센서의 주파수 대역은 센서 구동 회로의 충방전 주기가 짧을수록 커짐을 확인하였고 센서에 충방전 되는 전류의 크기에는 무관함을 알 수 있었다. 또한 크기가 다른 두 개 센서가 같은 주파수 특성을 보이는 것도 확인하였다. 이상의 결과에서 축전센서의 주파수 특성은 센서 자체의 특성에 의해서가 아닌 센서 구동회로의 특성에 주로 의존함을 알 수 있다. 제어실험에 사용되는 충방전 주기 97  $\mu$  sec 인 센서의 주파수 대역은 1kHz 이다.

### 3. 자기베어링 지지 로터계 모델링

본 절에서는 동위형 센서가 장착된 자기베어링 시스템의 성능을 실험 결과와 비교하기 위하여 자기베어링에 의해 지지되는 로터계를 모델링 한다. 자기베어링의 제어 실험에 사용되는 로터는 수직 형이며 하단부는 볼베어링에 의해 지지 되고 상단부가 자기베어링에 의해 지지 되는 구조이다. 로터의 전체 길이에 비해 그 반경이 상당히 크므로 로터를 강체로 모델링 한다. 볼베어링의 강성은 자기베어링의 강성에 비해 매우 크므로 볼베어링의 강성은 모델링하지 않고 단지 로터의 하단부는 볼조인트로 연결된 것으로 가정한다. 하단부가 구속된 로터는 두개의 자유도를 가질 수 있으므로 자기베어링 지지 로터계의 운동방정식은 다음의 두식으로 표현된다.[7]

$$M\ddot{x} + G\dot{y} = F_{mx} + \frac{l_b}{I} F_{dx} + \frac{1}{I} T_{dy} \quad (2)$$

$$M\ddot{y} - G\dot{x} = F_{my} + \frac{l_b}{I} F_{dy} - \frac{1}{I} T_{dx}$$

식(2)에서  $x, y$ 는 자기베어링 위치에서의 로터의 변위를,  $M$ 은 로터의 등가질량을,  $G$ 는 로터의 자이로스코픽 효과를 나타내는 항이다. 그리고  $F_{dx}, F_{dy}, T_{dx}, T_{dy}$ 는 로터의 질량 중심에 가해지는 외력을 나타내며,  $I$ 은 로터의 유효길이를  $l_b$ 는 로터의 질량 중심으로 부터 볼베어링 까지의 거리를 나타낸다. 한편 자기베어링의 자기력  $F_{mx}$ 와  $F_{my}$ 는 로터 변위  $x, y$ 와 코일에 공급되는 섭동전류  $I_{px}, I_{py}$ 의 선형화된 식으로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F_{mx} &= K_m x + K_i I_{px} \\ F_{my} &= K_m y + K_i I_{py} \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)에서  $K_m$ 과  $K_i$ 는 각각 자기베어링의 위치강성과 전류제인이다.

이제 식(2)와 (3)을 이용하면 자기베어링 지지로터계를 다음과 같은 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}} &= A\underline{x} + B\underline{u} + D\underline{w} \\ \underline{y} &= C\underline{x} \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서 출력벡터  $\underline{y}$ 는 센서 위치에서 측정된 로터의 변위이다.

#### 4. 제어기 설계

시뮬레이션과 자기베어링의 제어실험에는 PD 제어기를 사용하였다.

$$G_c(s) = K_p + K_d s \quad (5)$$

식(4)의 모델링을 이용하여 제어기의 변수를 결정한 후 후방변환방법(backward transformation)에 의하여 이산화 시킨다. 이산화된 제어기는 DSP 보드 내에서 구현되어 자기베어링의 제어에 이용된다. 식(6)은 이산화된 PD 제어기의 식으로서  $u$ 는 제어기 입력을,  $y$ 는 제어기 출력을 그리고  $T$ 는 디지털 제어기의 샘플링 시간 간격이다.[8]

$$y_k = \left( K_p + \frac{K_d}{T} \right) u_k - \frac{K_d}{T} u_{k-1} \quad (6)$$

Appendix에 모델링 변수 및 제어기 이득의 값을 제시한다.

#### 4. 시뮬레이션 및 실험

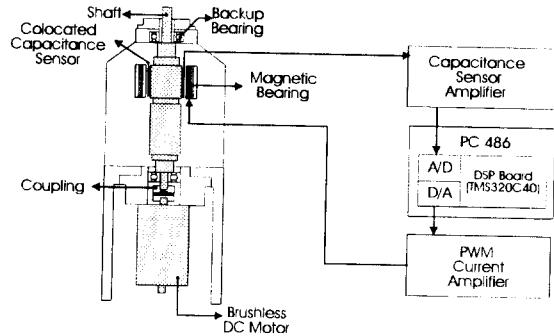


Fig. 9 Experimental set-up for magnetic bearing control

Fig. 9는 동위형 축전센서가 장착된 자기베어링의 성능을 실험하기 위한 장치의 간략도이다. 수직으로 설치된 로터의 상단부는 자기베어링이 지지하고 하단부는 볼베어링이 지지하고 있다. 로터를 구동하는 모터는 최고 속도 20,000 rpm의 brushless DC 모터로서 수직으로 설치된 로터와는 커플링으로 연결되어 있고 모터의 회전 속도는 모터에 내장되어 있는 엔코더를 이용하여 측정한다. 축의 상단부에 설치되어 있는 백업(backup) 베어링은 실험 중에 축이 자기베어링과 충돌하는 것을 막는 역할을 한다. 디지털 제어기는 Texas Instrument 사의 TMS320C40이 내장되어 제어연산 처리를 하는 DSP 보드와, 12-bit A/D 컨버터, 12-bit D/A 컨버터로 구성되어 있다. 제어출력 신호는 PWM 전류 증폭기로 입력되어 자기베어링 시스템을 구동하도록 되어 있다. 486PC에서는 DSP 보드의 제어기의 내부변수를 Dual-port RAM을 통하여 모니터링 한다.

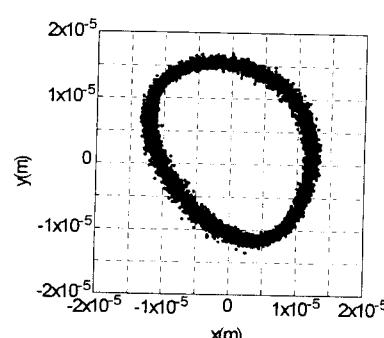


Fig. 10 Orbit of rotor at 5,000rpm

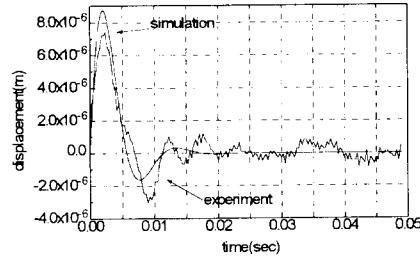


Fig. 11 Impulse response

Fig. 10 은 로터 회전 속도 5,000rpm에서의 동위형 축진센서로 측정한 로터의 중심 궤적이다. 로터의 중심이 지름 30 $\mu\text{m}$ 정도로 제어되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 11은 로터를 정지 시킨 상태에서 질량 중심에 임펄스 외란을 가한 경우의 시스템의 응답 특성이다. 시뮬레이션 결과와 실험결과가 일치하고 있다. 0.01sec 이후의 로터의 응답은 축전센서의 노이즈 성분에 의한 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 동위형 축전센서를 설계 제작하여 자기베어링의 제어에 이용 하였다. 자기장의 영향을 받지 않는 축전센서는 자기베어링과 동위하여 설치할 수 있어서 센서와 액튜에이터 위치의 불일치에서 발생하는 문제점을 개선할 수 있다. 센서는 PCB를 이용하여 제작 하였으며, 센서 구동 회로는 Chapman 모델을 기초로 하여 제작 하였는데 센서의 선형성을 항상 시키기 위한 정전류 회로를 보완 하였다. 제작된 축전 센서의 성능은 범위 민감도 실험과 주파수 특성 실험을 통하여 확인 하였다. 그리고 동위형 축전센서가 장착된 자기베어링 시스템의 성능을 확인 하기 위하여 자기베어링 지지 로터계를 모델링 한 후 이를 자기베어링의 제어 실험 결과와 비교하였다.

## 참고문헌

- [1] Allaire, P. E., and Humphris, R. R., "Dynamics of a Flexible Rotor in Magnetic Bearings", 4th Workshop on

Rotor Dynamics Instability Problems in High Speed Turbomachinery, Texas A&M Univ., June 1986

- [2] Maslen, E. H., and Lefante, V. S., "Transfer Function Zeros in Noncollocated Flexible Rotor Models", Proceedings of the 3rd International Symposium on Magnetic Bearings, 1992, pp242-252
- [3] Barrett, L. E., Brockett, T. S., and Maslen, E. H., "Analysis of Rotors with Non-Collocated Magnetic Bearings Using Transfer Matrices", Proceedings of MAG'92, 1992, pp144-154
- [4] Chapman, P. D., "A Capacitance Based Ultra-precision Spindle Error Analyser", J. of Precision Engineering, Vol. 7 No. 3, July 1985, pp29-536
- [5] 장인배, "판형 캐패시턴스 센서가 내장된 자기베어링의 작동성능 향상에 관한 연구", 서울대학교 공학박사학위 논문, 1995
- [6] Ortiz Salazar, A., Dunford, W., Stephan, R., and Watanabe, E., "A Magnetic Bearing Systems Using Capacitive Sensor for Position Measurement", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 26, No. 5, Sept. 1990, pp2541-2543
- [7] 김종원, "자기베어링 지지 로터계를 위한 견실한 중앙집중식 서보제어기의 설계", 대한기계학회 논문집, 제 16 권 제 6 호, 1992, pp1141-1149
- [8] William, R. D., Keith, F. J., and Allaire, P. E., "Digital Control of Active Magnetic Bearings", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 37 No. 1, Feb. 1990, pp19-27

## Appendix : Modeling & controller parameters

Equivalent mass of rotor :  $M=0.5951 \text{ kg}$

Gyroscopic term :  $G=4.2994 \text{ Ns/m}$

Effective rotor length :  $l=133 \text{ mm}$

Location of ball bearing from C.M. of rotor :  $l_b=90.7 \text{ mm}$

Position stiffness :  $K_m=172000 \text{ N/m}$

Current gain :  $K_I=121.3 \text{ N/A}$

Proportional gain of PD controller :  $K_p=3400$

Derivative gain of PD controller :  $K_d=3$