

## Inductive Sensor를 이용한 고진공 분자펌프용 자기부상계의 제어

노승국\*(KIMM), 박병철(충남대 대학원), 정민경(충남대 대학원), 노명규(충남대)  
박종권(KIMM), 경진호(KIMM), 구본학(제일진공)

### Control of a Magnetic Suspension System with Inductive Sensors for a High Vacuum Turbomolecular Pump

S. K. Ro(KIMM), B. C. Park, M. K. Jung(Mechatronics Dept. Chungnam Univ.),  
M. K. Noh(Chungnam Univ.), J. K. Park, J. H. Kyung(KIMM), P. H. Ku (Jeil Vac Co.)

#### ABSTRACT

In this paper, a magnetic suspension system with inductive sensors for a high vacuum turbomolecular pump(TMP) is discussed. The performance of designed inductive position sensor is evaluated by static and dynamic test, and the test results show sensitivity of about 6,000 V/m and dynamic bandwidth of 750 Hz. The prototype of magnetic suspension system is designed and constructed with 5-axis magnetic bearing, inductive sensor and BLDC internal motor. With DSP based digital PID control system, the prototype is examined its high damping ratio and stable operation up to 20,000 rpm of rotation.

**Key Words :** Magnetic bearing system (자기베어링), Inductive sensor (유도형 센서), Turbomolecular pump(터보분자펌프), Digital control system (디지털 제어)

#### 1. 서론

반도체 공정 등에서  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  Torr의 고진공 환경을 제공하기 위하여 사용되는 고진공 터보분자펌프(Turbomolecular Pump, TMP)는 다중의 회전깃을 갖는 로터를 회전시켜 분자를 배기하는 방식으로, 고진공을 위해서는 고속회전이 필요하며 로터-블레이드 부 및 구동부에서의 고진공 환경이 필요하다. 따라서 최근의 고진공 터보분자펌프는 대부분 25,000 ~ 40,000 RPM의 자기부상형이 주를 이루고 있다.

자기부상형 TMP 시스템에 사용되는 자기베어링 시스템은 전자기력을 이용하여 자성체인 회전축을 부상지지 함으로써 비접촉 고속 회전이 가능하여 윤활이 용이하지 않은 진공 환경 등 가혹한 환경에 적합하여 우주산업이나 진공산업에 사용되고 있다. 한편, 이러한 자기베어링 시스템은 불안정한 특성을 갖는 개루프계의 안정화를 위하여 능동제어 시스템

이 필수적이며 이러한 제어시스템을 통하여 고감쇠 및 진동제어 등의 장점을 얻을 수 있다. 이러한 제어 시스템은 축의 변위를 측정하는 센서와 전자석의 코일에 전류를 인가하는 전력증폭기, 그리고 제어 알고리즘을 구현하는 디지털 혹은 아날로그 제어기가 요구되어 이런 요소들은 자기베어링을 채용한 기계의 비용을 상승시키는 요인으로 시스템 개발시 비용을 고려한 개발이 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 고진공 터보분자펌프용 자기베어링 시스템 제어를 위한 인덕티브 센서를 개발하였으며 개발된 센서의 정, 동 특성을 검토하고 시작 시스템에 적용하여 제어실험을 수행하였다. 실험 결과 설계 제작된 인덕티브 센서의 감도는 약 6,000 V/m이고 약 750 Hz의 응답 대역폭을 보여 제어안정성 보장에 충분한 성능을 보였으며 고감쇠의 응답을 갖는 제어시스템을 구현하여 20,000 RPM 까지 안정적인 회전특성을 얻었다.

## 2. 자기베어링용 인덕티브 센서

### 2.1 개요

자기베어링 시스템에서 변위센서는 제어대상인 변위를 측정하는 것으로 시스템의 정밀도 및 안정성에 중요한 변수이다. 이러한 센서로서 갖추어야 할 조건으로는 0.4mm의 자기베어링 공극에서의 선형성을 갖는 응답특성과 적절한 분해능을 갖는 정밀도, 그리고 제어 안정성을 위하여 높은 대역폭을 갖는 동특성을 필요로 한다.

유도형 변위센서는 제작 비용이 저렴하면서 구조가 간단하고 밀폐된 환경에서도 사용이 가능하며 선형성과 정밀도 및 동특성도 높게 설계할 수 있는 장점이 있으나 고주파의 자기유도를 이용하므로 측정 대상체에도 적층이 필요한 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 유도형 센서의 특성으로 감지범위는 베어링 공극인  $\pm 0.2\text{mm}$ , 감도는  $5000\text{V/m}$  이상, 선형성은 1% 이내, 대역폭은 시스템 고유진동수를 50~70 Hz로 보았을 때 이의 10배인 700Hz 이상을 목표로 한다.

### 2.2 Inductive Sensor의 기본원리

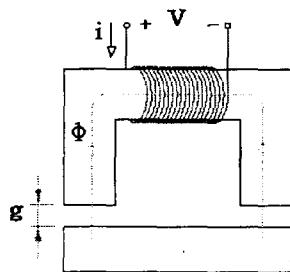


Fig. 1 Schematic of an inductive sensor

Fig.1과 같이 코어에 코일이 N번 감겨져있고, 코어의 끝단과 타깃파의 거리가 g 일 때, 코일에 전압 V를 인가하면 그때의 자속, 전압, 전류의 관계는 Faraday의 법칙에 의해 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$V = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (1)$$

이때 코어의 투자율을 0으로 놓고 와전류, 누설자속, 프린징(fringing), 히스테리시스 등을 무시하면 센서의 인덕턴스를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{2g} \quad (2)$$

(2)식에서 인덕턴스는 공극에 따라 변함을 알 수 있다. 그리고 가해지는 전압의 주파수가 높으면 저항에 의한 영향을 무시할 수 있으므로 (2)식을 (1)식에 대입하면 공기간극의 크기는,

$$g = \frac{\mu_0 N^2 A}{2V} \frac{di}{dt} \quad (3)$$

와 같이 됨을 알 수 있다. 여기에서 가해주는 전압은 미리알고 있는 양이 되므로, 전류의 시간변화 값( $di/dt$ )만 측정하면 공극의 크기를 알 수 있게 된다.

### 2.3 Inductive Sensor의 구현

식(3)의  $di/dt$  값을 알기 위한 간단하게 연산증폭기(opamp)를 사용해 미분기를 만들 수 있지만 잡음에 상당히 취약한 약점을 가지고 있어 본 연구에서는  $\Delta i/\Delta t$ 를 구하는 방법을 사용하였다. 즉, 가해주는 전압을  $+V$ 에서  $-V$ 로 스위칭하는 주기가  $2 \times \Delta t$ 인 사각파를 주게 되면 전류 값의 진폭을 통해  $\Delta i/\Delta t$ 값을 알 수 있게 된다.

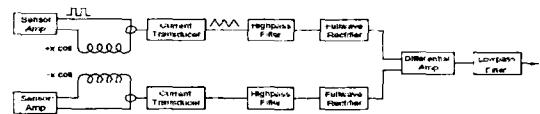


Fig. 2 Sensor signal processing circuit

이러한 신호처리 방법은 Fig.2에 나와 있는 것과 같다. 기본적으로 센서를 쌍으로 사용하였는데 이렇게 하면 센서의 감도를 높이고, 또한 환경의 변화에 민감하지 않는 장점을 가지고 있다. 전류 값의 신호처리 방법은 기본적으로 통신에서 쓰이는 AM방식의 복조방법과 유사하다. 신호처리 회로는 고역통과필터, 전파정류기, 저역통과필터로 구성되어 있다. 고역통과필터는 DC 오프셋 값을 없애주고, 전파정류기는 신호중 음의 값을 갖는 성분을 양의 값을 갖도록 만들어 주어 평균이 0이 안되게 해주는 역할을 가지고 있다. 최종적으로 저역통과 필터는 신호의 진폭 값을 추출한다. 즉, 저역통과 필터의 특성이 센서의 동특성에 가장 큰 영향을 주게 된다.

### 2.4 유도형 센서의 제작 및 성능 평가

Table 1과 Fig. 3은 설계된 반경방향 센서 프로브를 나타내고 있다. 16개의 극을 가지고 있으며 서로 마주보고 있는 8개의 극(1-2-3-4 vs 9-10-11-12)이 한 축(x)을 측정하게 된다. 센서는 0.35mm 두께의 절연 규소강판을 적층하여 제작하였으며 제작된 시스템의 정, 동적 특성을 시험을 통하여 알아보았다.

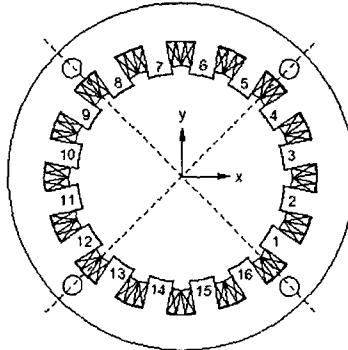


Fig. 3 radial inductive sensor probe stator

Table 1 specification of designed inductive sensor

nominal air gap	0.5mm
Coil turns per pole	80
outside diameter of stator	70mm
journal diameter	44mm
thickness of lamination	0.35mm
axial thickness	3.15mm
Switching frequency	20kHz
Supply voltage	48V

#### 2.4.1 정적 성능 평가

센서의 정적인 특성의 실험은 Fig. 4와 같이 정밀 이송이 가능한 XY 스테이지 위에 측정 달각을 부착하여 변위에 대한 응답을 측정할 수 있는 실험장치에서 테스트되었다.

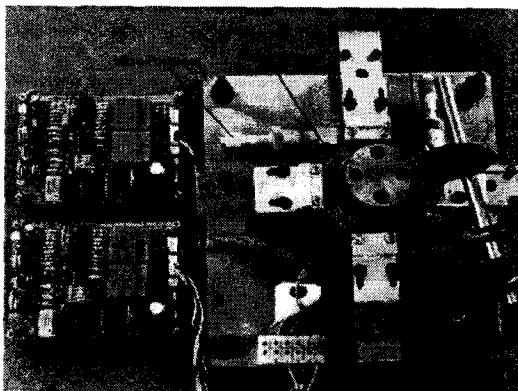


Fig. 4 inductive sensor test rig and circuits

Fig. 5는 스테이지를 -0.2mm에서 +0.2mm를 움직였을 때 유도형센서의 출력 전압을 도시한 것으로, 전압의 출력이 ±1.2V로 감도는 6,000 V/m, 최대선형오차는 0.5% 이하로 우수한 정적 성능을 보이고 있다.

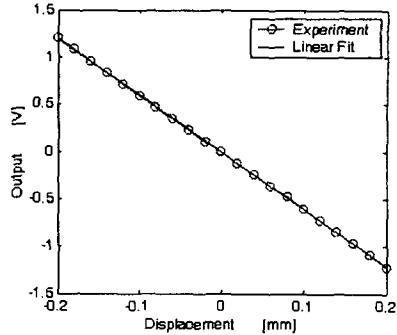


Fig. 5. Static sensor output

#### 2.4.2 동적 성능 평가

동적 성능은 조립된 시험 주축계의 자기베어링 전자석에 가진 신호를 입력하여 축을 가진시키면서 동특성이 우수한 와전류형 센서(AEC-5505, 대역폭 30kHz)의 응답과의 전달함수를 측정하였다. Fig. 6은 주파수 응답실험결과를 보여주고 있다. 이때 위상의 응답은 센서 회로의 저역통과 필터의 특성과 거의 일치함을 볼 수 있으나 센서의 진폭기준의 대역폭은 약 750Hz 정도로 측정이 되었으며 식(4)의 2 차의 전달함수로 모델 시,  $\omega_n = 2\pi \times 750 \text{ rad/s}$ ,  $\zeta_s = 0.7$  정도로 모델 될 수 있다. 이는 목표로한 대역폭 700Hz를 상회하는 수치로 제어에 충분한 성능으로 볼 수 있다.

$$G_{\text{sens}}(s) = \frac{\omega_n^2 K_s}{s^2 + 2\zeta_s \omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

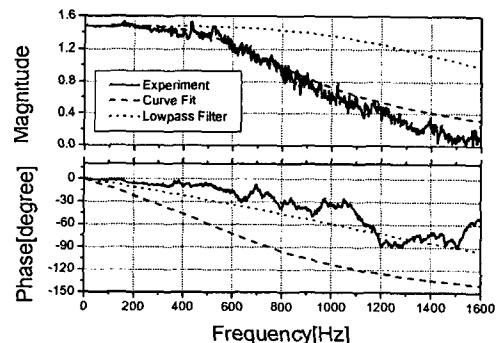


Fig. 6 Frequency response of inductive sensor

### 3. TMP용 자기부상 시스템

#### 3.1 실험 주축계 개요

TMP용으로 설계된 자기부상 회전축 실험 시스템은 Fig. 7과 같다. 상하 각각의 반경방향 자기베어링

전자석과 반경방향 유도형 센서가 위치하며 중앙에 BLDC모터, 하부에 축방향 하중을 지지하는 축방향 자기베어링이 위치하고 있다. 각 반경방향 자기베어링의 주요 제원은 다음의 Table 2와 같다.

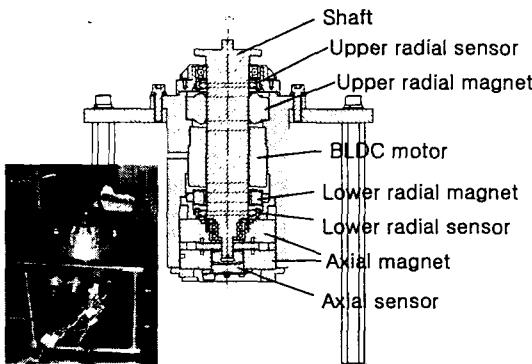


Fig. 7 Test spindle system for TMP

Table 2 Specification of radial magnetic bearings

Item	Upper Bearing	Lower Bearing
air gap, $g_0$ [mm]	0.25	0.25
pole face area, $A_p$ [ $\text{mm}^2$ ]	230	85
number of turn, $N$ [times]	170	170
resistance of a coil, $R_{\text{coil}}$ [ $\Omega$ ]	1.6	0.9
bias current( $B_0=0.23[\text{T}]$ ), $I_0$ [A]	0.3	0.3
inductance of a coil, $L_0$ [ $\text{H}$ ]	0.0683	0.0247
current gain, $K_x$ [N/A]	155	58
position gain, $K_v$ [N/m]	$1.68 \times 10^5$	$6.21 \times 10^4$

### 3.2 자기베어링 제어시스템

자기베어링 제어기는 각각의 센서응답을 직접 PID제어를 이용 케환시키는 제어기가 일반적으로 적용되며 본 연구에서는 블레이드 로터를 장착하지 않은 축의 극관성 모멘트가 크지 않으므로 고속회전까지 사용이 가능하다. 이때 1 축에 대한 제어 블록 선도는 Fig. 8과 같다.

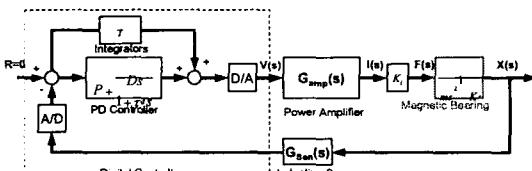


Fig. 8 block diagram of 1-dof feedback control system

제어기는 DSP(TMS320C6701, SBC67)를 사용하는 디지털 제어기를 사용하여 16-bit, 100kHz의 A/D 와 D/A로 구성되어 있으며 제어시스템의 샘플링 주

파수는 10kHz이다. 여기서 전력증폭기의 전달함수는 실험결과를 통하여 식(5)의 2차함수로 근사화할 수 있으며 실험결과 약 0.05A/V의 증폭비를 가지며 상부 베어링의 경우  $K_{\text{amp}}=0.048\text{A/V}$ ,  $\omega_{np}=1714\text{Hz}$ ,  $\zeta_p=0.51$ , 하부 베어링의 경우  $K_{\text{amp}}=0.049\text{A/V}$ ,  $\omega_{np}=2815\text{Hz}$ ,  $\zeta_p=0.62$ 의 고주파 응답특성을 보이고 있어 전체 시스템 안정성에 큰 영향은 없다고 할 수 있다.

$$G_{\text{amp}}(s) = \frac{\omega_{np}^2 K_{\text{amp}}}{s^2 + 2\zeta_p \omega_{np} s + \omega_{np}^2} \quad (5)$$

Fig. 8의 제어시스템에서 비례계인  $P$ 와 미분계인  $D$ , 적분계인  $K_i$ 를 갖는 PID제어계( $\tau_d = 0.00005$ )에서 앰프 및 센서의 대역폭이 충분히 커서 동특성을 무시하는 경우 변위  $x_1$ , 전류  $i_{x1}$ , 등가 질량을  $m_{x1}$ 라 할 때, 위의 PD 제어기를 식(6)과 같이 나타낼 때, 시스템의 안정성을 만족하기 위한 조건은 식(8)과 같이 간략하게 나타내어 질 수 있다.

$$m_{x1} \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} - K_x x_1(t) = K_{i1} i_{x1}(t) \quad (6)$$

$$i_{x1}(t) = -K_{\text{amp}} K_s P_1 x(t) - K_{\text{amp}} K_s D_1 \frac{dx(t)}{dt} \quad (7)$$

$$P_1 K_{\text{amp}} K_s K_{ix} - K_x > 0, \quad D_1 > 0 \quad (8)$$

여기서 제어계인은 원하는 강성과 감쇠비를 갖도록 설계할 수 있으며, 설계된 강성을  $K_{eq1}$ , 감쇠비를  $\zeta_1$ 이라고 할 때 비례계인과 미분계인은 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$P_1 = \frac{K_{eq1} + K_{ix}}{K_s K_{\text{amp}} K_i},$$

$$D_1 = \frac{2\zeta_1 \sqrt{m_{x1} K_{eq1}}}{K_s K_{\text{amp}} K_i} \quad (9)$$

이렇게 설계된 계인은 상부베어링의 경우  $P=6.5$ ,  $D=0.001$ 이며 하부베어링에서는  $P=8.0$ ,  $D=0.002$ 이다.

### 4. 제어실험 결과

Fig. 10은 자기베어링의 부상시에 설정된 제어계인에서 상부 및 하부 베어링의 제어기에 0.5V이 단위계단응답을 주어 나타난 결과이다. 그림에서 과도 응답이 없는 고감쇠의 응답특성을 볼 수 있으며, 강성에 의하여 정상상태 오차가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 적분계인의 추가로 해결할 수 있다. Fig. 10b 하부 베어링의 명령에 대한 응답에서는 상

부 베어링의 변위가 발생하여 상, 하부사이의 자유도 연성이 존재하고 있으나 상대적으로 적은 양이어서 직접 회전을 통한 제어방식이 유효함을 확인할 수 있다.

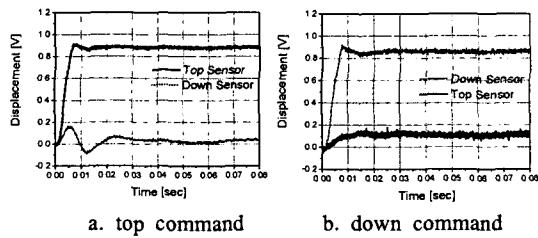


Fig. 10 step response of radial magnetic bearings

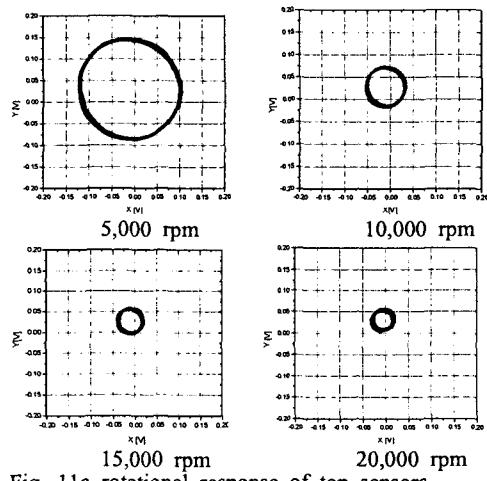


Fig. 11a rotational response of top sensors

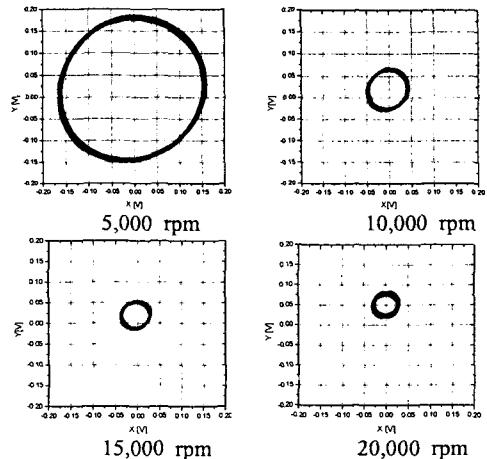


Fig. 11b rotational response of down sensors

또한 Fig. 8은 설계된 제어계인에서의 20,000 rpm 까지의 회전응답을 나타내고 있다. 5,000 rpm이하의 저속에서는 약 0.25V(42 $\mu$ m), 아래쪽 센서는 0.35V(58

$\mu$ m)의 응답이 나타나고 있으나 고속에서는 각각 0.06V(10 $\mu$ m) 0.1V(16 $\mu$ m) 이하의 응답이 나타나며 안정적인 회전을 하고 있다. 센서의 응답은 원형으로 회전수 성분만 나타나고 있어 1차 성분의 런아웃에 의한 응답으로 볼 수 있다. 이러한 런아웃은 주축의 진동발생의 원인이 되므로 추후 연구에서 제거될 필요가 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 고전공 터보분자펌프의 자기부상 구동계용 유도형 센서를 설계 제작하고 시험시스템에 장착하여 PID제어를 이용한 제어실험을 수행하였다. 개발된 유동형 센서는 감도 6,000V/m, 대역폭 750Hz이 동특성을 보였다. 설계 제작된 자기베어링 시험주축계의 실험결과 고감쇠의 특성을 갖는 안정부양이 가능하였으며 20,000 rpm 까지의 안정적인 회전 특성을 나타내었다.

향후 회전실험결과 나타난 런아웃의 영향제거등을 통한 축 진동 저감과 회전깃-로터부를 포함한 회전체의 제어시스템 개발 등을 수행할 예정이다.

## 후기

본 논문은 산업자원부 지원 산업기반기술개발 사업의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. G. Schweitzer, H. Bleuler, A. Traxler, "Active Magnetic Bearings", vdf, 1994
2. 박종권, 노승국, 안대균, "연삭기용 자기베어링 주축계의 고속화에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 15권 11호, pp233-243, 1998
3. M. G. Noh , M. Jeong, B. Park, J. Park, S. Ro, "Development of a Low Cost Inductive Sensor Using Switching Noise Demodulation" in Proceedings of the 8th International Symposium on Magnetic Bearings. 2002
4. 노명규, 정민경, 박병철, "와전류와 히스테리시스를 고려한 유도형 변위센서의 자기회로 모델 개발", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 267-270, 2002
5. 신우철, 홍준희, 이동주, "고속 주축 상태 모니터링용 유도형 변위센서의 특성 평가", 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp.65-68, 2002