

능동 자기 베어링 방식의 자기 부상 원심성 혈액 펌프를 위한 유도성 근접 센서 개발

김 형일, 김 희찬

서울대학교 대학원 협동과정 의용생체공학 전공, 서울대학교 의과대학 의공학교실

Development of an Inductive Proximity Sensor in Active Magnetic Bearing System for Magnetically Suspended Centrifugal Blood Pumps

H. I. Kim, H. C. Kim

*Interdisciplinary Program, Biomedical Engineering Major, Graduate School and
Department of Biomedical Engineering*, College of Medicine,
Seoul National University

ABSTRACT

AMB(Active Magnetic Bearing) systems are popularly used in various areas. In biomedical engineering applications it is a key part of magnetically suspended rotary blood pumps. The special advantage of AMBs is that they enable the rotor to revolve with no physical contact and provide rotary blood pumps with better performances such as low hemolysis level. Fundamentally, AMB systems consist of three parts, proximity sensors for distance detection, microprocessor for control algorithm and power amplifiers for actuating electromagnets. We have developed an inductive type proximity sensor with satisfactory characteristics that can be used in AMB systems. Frequency response was flat at least up to 10 kHz and sensitivity, resolution(>5 μm) and sensing range(<5mm) of the sensor could be adjustable for various purposes. The characteristics of the completed model showed to have satisfactory behaviors compared with the commercially available ones that already appeared to have reliable behaviors in AMB systems.

서론

능동 자기 베어링은 메카트로닉스(Mechatronics)의 대표적인 산물로서 진공 기기, 고속 터보 기기, 자기 부상 열차 등의 영역에서 많이 쓰이는 시스템이다. 자기 베어링의 큰 장점은 회전자가 고정자와 접촉 없이 회전한다는 점과 회전자의 동적 특성을 제어할 수 있다는 점이다. 이러한 장점으로 인해 신뢰도를 높여 제품의 수명을 연장시켜주며 기기의 유지, 보수에 드는 비용을 절감하는 효과도 가져오게 된다. 의공학 분야에서도 원심성 혈액 펌프 등, 회전 펌프의 베어링으로 자기 베어링이 응용되고 있다. 심실 보조 장치, 심폐 바이패스 장치 등으로 쓰이는 원심성 혈액 펌프는 기존의 펌프들에 비해

간단해진 구조와 낮은 혈전 수준 등으로 인해 최근에 연구가 활발히 이루어지고 있다. 기존의 원심성 혈액 펌프들에 내장된 기계 베어링은 혈액과 직접 접촉하고 있어서 혈전 현상이 일어나는 등, 만족할 만한 성과를 이룰 수 없어 점차 자기 베어링으로 대체돼 가고 있는 추세이다.

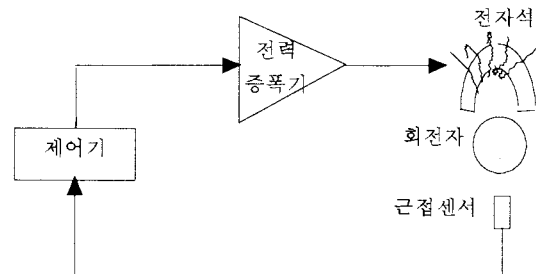


그림 1 능동 자기 베어링 시스템

자기 베어링은 그림 1에서 볼 수 있듯이 기본적으로 거리 측정을 위한 근접 센서, 전자석을 구동하기 위한 전력 증폭기, 제어 알고리즘 구현을 위한 마이크로프로세서의 세 부분으로 이루어져 있다[1]. 이 가운데 근접 센서의 성능은 자기 베어링의 효율과 성능을 결정 짓는 중요한 요소 중의 하나이다. 센서의 특성을 좌우하는 파라미터들로는 측정 거리, 선형성, 민감도, 분해능, 주파수 응답 등을 들 수 있으며 이 모든 변수들을 고려하여 센서를 설계해야 한다. 본 연구에서는 유도성 근접 센서를 설계하여 실제로 자기 베어링에 쓰이는 상용 유도성 근접 센서의 특성 파라미터들에 버금가는 성능을 확인 하였으며, 장치 실제로 자기 부상 방식의 원심성 혈액 펌프용 자기 베어링 시스템을 구성하는데 쓰일 예정이다.

본론

1. 유도성 근접 센서의 작동 원리

그림 2와 같이 철심(ferrite core)에 코일을 감은

후 높은 주파수(5kHz~100kHz)의 변조 신호를 가하면 자성 금속이 움직임에 따라 인덕턴스의 변화가 생기게 된다. 이때 코일 양단의 전압이 변하는데 이

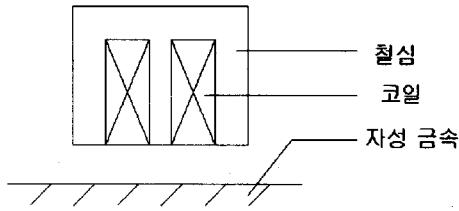


그림 2 유도성 근접 센서의 원리

신호를 복조, 여과, 증폭시키면 자성 금속까지의 거리를 검출할 수 있다.

2. 거리 검출 회로

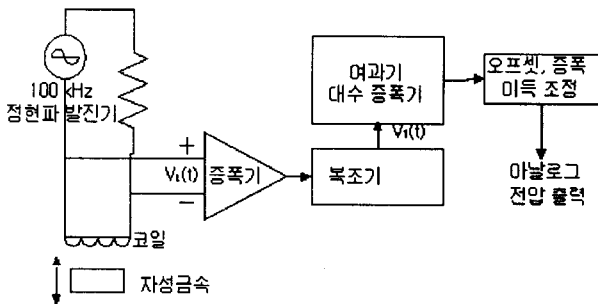


그림 3 거리 검출 회로

그림 3과 같이 거리 검출 회로를 설계하였다. 안정된 순수 정현파 발진을 위해 빈 브리지 발진기(Wien Bridge oscillator)[2]를 이용하여 100kHz의 반송파(\$v(t)\$, 식 (1))를 만들어낸 후 이를 코일 양단에 가한다. 자성 금속이 움직임에 따라 코일 양단간의 전압(\$v_L(t)\$, 식 (2))이 변하게 되고 이를 버퍼링된 차동 증폭기(instrumental amp)를 이용하여 증폭한다. 여기서 얻어진 정현파의 진폭(\$v_1(t)\$, 식 (3))을 검출하기 위해 실효치-직류 변환기(RMS to DC converter)를 이용하였다. \$R^2 \gg \omega_c^2 L^2\$이 되도록 하면 식 (3)과 같이 거리에 반비례하는 복조기의 출력이 나오는데 이를 최종단에서 여과기와 대수 증폭기(logarithm amplifier)[2]를 사용하여 증폭하면 식 (4)와 같은 과정을 통해 선형으로 근사화된 신호를 얻게 된다. 여기서 다시 오프셋과 증폭 이득을 사용자의 목적에 맞게 적절히 바꾸어 주면 거리에 비례하는 아날로그 출력 신호를 얻게 된다.

$$v(t) = V \cos \omega_c t \quad (\omega_c = 100 \text{ kHz}) \quad (1)$$

$$v_L(t) = \frac{\omega_c L(x)}{\sqrt{R^2 + \omega_c^2 L(x)^2}} V \cos(\omega_c t + \phi) \quad (2)$$

$$v_1(t) = \frac{\omega_c L(x)}{\sqrt{R^2 + \omega_c^2 L(x)^2}} \frac{V}{\sqrt{2}} \times \text{Gain}$$

$$\approx \frac{\omega_c}{R} \frac{V}{\sqrt{2}} \times \text{Gain} \times L(x) \quad (R^2 \gg \omega_c^2 L^2)$$

$$\propto L(x) \approx L_0 + \frac{L_1}{x} \quad (3)$$

$$\log(v_1(t) - L_0) = \log\left(\frac{L_1}{x}\right) \quad (4)$$

$$= \log L_1 - \log x \approx a - bx$$

결 과

제작한 근접 센서의 분해능은 잡음과 구별되는 신호의 최소 변동치로서 약 \$5\mu\text{m}\$ 정도 되었다. 측정 거리와 민감도는 오프셋과 증폭 이득을 조정함으로써 바꿔줄 수 있었으며 그 범위는 각각 0~5mm, 5

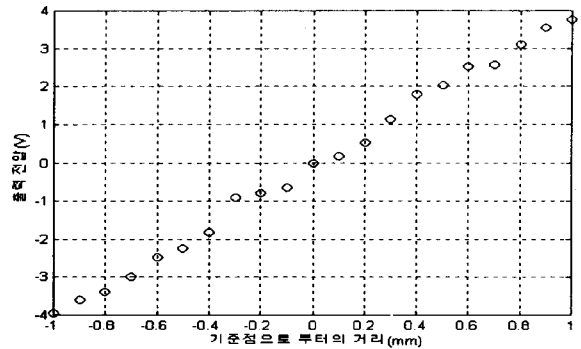


그림 4 출력의 특성 곡선

mV/\$\mu\text{m}\$ 이하로 나타났다. 아래의 그림 4의 출력 곡선과 특성 파라미터들을 상용 근접 센서들과 비교해 볼 때 전혀 뒤지지 않는 것으로 나타났다.

결 론

자기 부상형 원심성 혈액 펌프용 자기 베어링 구현을 위한 첫 단계로 유도성 근접 센서를 제작하여 성능 실험을 통해 위의 결과에서와 같이 만족할만한 특성을 얻어냈다. 자기 베어링 시스템의 핵심 부품 중의 하나인 근접 센서의 제작으로 인해 보다 저가의 개발비로 우수한 성능의 시스템 구현이 가능해 졌으며 사용 목적에 따라 센서의 측정 거리, 분해능 등을 변화시킬 수 있어 다양한 방면으로의 응용 또한 가능하다. 몇 가지 예로, 총알과 같이 고속으로 움직이는 금속 물체의 속도를 측정하거나 공장에서 제품의 불량률 자동 검출하는데 쓰일 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] Gerhard Schweitzer, Hannes Bleuler, Alfons Traxler, "Active Magnetic Bearings", Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1998
 [2] Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, "Microelectronic Circuits", Saunders College Publishing, 3rd, 1991