

자기베어링 시스템에서의 변위측정을 위한 홀 효과 센서의 기초 연구 A Basic Study of Displacement Measurement of Magnetic Bearing System Using Hall Effect Sensor

양주호 · 정광교 · 정황훈 · 손수강

J. H. Yang, G. G. Jeong, H. H. Jeong and S. K. Son

Key Words : Displacement Measurement (변위 검출), Hall Effect Sensor (홀 효과 센서), Magnetic Bearing System(자기 베어링 시스템)

Abstract : Since the magnetic bearing system has unstability inherently it is necessary to measure the displacement for stable operation. Normally the displacement measurement is implemented by using sensors. The sensor for the displacement measurement is selected by precision, installation space, effect of magnetic field and response speed. And the cost of displacement measurement sensor also is considered. At the cost the hall effect sensor has a large advantage comparing with the others. Therefore this study concern about the basis experimental test for the displacement measurement of the magnetic bearing system that uses the hall effect sensor coupled with a tiny permanent magnet. The experimental results confirm the validity and practicability for this displacement measurement sensor.

1. 서 론

기계적 접촉이 없는 능동 자기베어링은 정밀 스피들, 고속 펌프, 원심분리기 등의 고속 회전체에 많이 응용되어 왔다. 그리고 능동 자기베어링은 축을 정밀하게 지지할 수 있다는 점과 특수 환경에서도 사용할 수 있다는 큰 장점을 가지므로 인공 심장, 로봇, 인공 위성 등에 응용된다. 하지만, 이러한 능동 자기베어링 시스템은 근본적으로 불안정한 계이므로 계를 안정화시키기 위해 자기베어링과 부상체간의 공극을 제측하여 귀환시키는 것이 필요하다.¹⁾

능동 자기베어링 시스템에서의 변위 검출에는 보통 와전류식²⁾, 광학식, 용량식³⁾ 등과 같은 측정용 센서가 이용된다.⁴⁾ 이러한 변위 검출용 센서의 선택은 변위 정도, 설치공간, 자장의 영향 및 측정속도 등의 요인을 고려하여 선택되어지며, 또한 자기베어링의 실용화 측면에서는 변위센서의 가격도 무시할 수 없는 요인으로 고려되어진다.⁵⁾

본 연구에서는 능동 자기베어링 시스템에서 변위 검출에 사용되어지는 여타의 측정용 센서에 비해 경제적인 면에서 큰 장점을 가지고 있는 홀 효과 센서를 이용하기 위하여 기초 실험을 행하였다. 홀 효과 센서의 표면에 자속을 발생시킬 소형의 영구자석을 부착하여 변위 측정 장치를 설계 제작한 후, 피 측정물의 변위에 대한 정적 실험과 동적 실험을 행하였다. 그리고 이 실험을 통하여 설계 제작된 변위 측정 장치가 자기베어링 시스템의 변위 측정 센서로서 유용함을 확인 하였다.

2. 홀 효과 센서

2.1 미소변위 측정방법

자기 부상계의 변위를 측정하는 방법에는 코일의 인덕턴스 등과 같은 시스템 파라미터가 간극에 따라 변화하는 성질을 이용하는 센서리스 방법과 와류식 센서, 광학식 센서, 용량식 센서, 홀효과 센서 등과 같은 변위 측정용 센서를 이용한 방법이 있다.

전자의 경우는 위치 검출점과 제어점을 일치시킬 수 있는 장점을 가지며, 특별한 외부 센서를 필요로 하지 않기 때문에 저렴한 시스템을 구현할 수 있다. 하지만, 측정하고자 하는 변위를 연산하여야 하기

접수일 : 2007년 1월 26일, 채택확정 : 2007년 2월 17일
양주호(책임저자) : 부경대학교
E-mail : jhyang@mail.pknu.ac.kr Tel. : 051-620-1580
정광교 : 선박검사기술협회
정황훈 : 부경대학교 대학원 제어기계공학과
손수강 : (주)효성모터

때문에 센서가 존재하는 경우보다 느린 응답속도를 가지게 된다.

후자의 경우는 응답속도가 빠르다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 센서의 정도와 속도에 따라 높은 가격을 가지며, 시스템의 구조상의 제약이나 센서 부피 등으로 인해 위치 검출점과 제어점이 불일치하여 시스템을 불안정하게 하기도 한다.^{6),7)}

자기 부상계의 상용화에 있어서 변위 측정에 고려되어야 하는 점은 변위의 정도, 센서의 설치 공간, 센서의 자장에 대한 영향 및 측정 속도 등이며, 이외에도 자기 부상계의 제작 시 소요 비용도 고려되어야 한다.

홀 효과 센서의 경우 다른 변위 측정 센서에 비해 저렴한 가격을 가지고 있으며, 그 크기 또한 상당히 작다. 응답속도 또한 센서리스 방법에 비해 상당히 빠르다. 따라서 저렴한 능동 자기베어링 시스템을 구현하기에는 여타의 센서를 사용하기 보다는 홀 효과 센서를 이용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

2.2 홀 효과 센서에 대한 이론적 배경

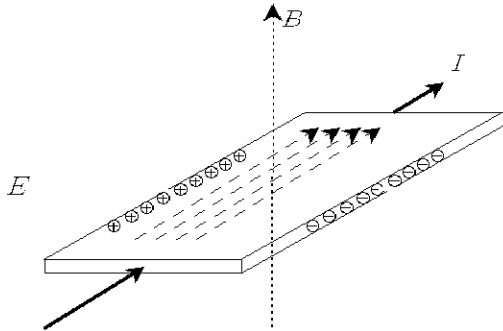


Fig. 1 Hall effect

홀 효과는 Fig. 1과 같이 막대모양 혹은 판자모양 도체나 반도체에 전류를 흘리고 여기에 수직방향으로 자계를 걸면 전류와 자계에 수직된 방향으로 전기장이 형성되는 현상이다.

이때 발생하는 전기장의 세기는 식 (1)과 같이 나타난다.

$$E = kIB \tag{1}$$

여기서, E 는 홀 기전력에 의한 전기장의 세기 [V/m], k 는 홀 정수[m²/C], I 는 전류 밀도[A/m²], B 는 자속 밀도[Wb/m²]이다.

또한, 자속 밀도는 식 (2)와 같이 자기력과 투자율로 표현된다.

$$B = \mu H \tag{2}$$

여기서, μ 는 투자율, H 는 자기력의 세기[A/m]이다. 따라서, 식(1)과 식(2)로부터 알 수 있듯이, 홀 센서와 도체 사이의 거리가 변동함에 따라 투자율 μ 가 변동하게 되고, 이는 자속 밀도 B 를 변동시켜, 결국 홀 효과에 의해 발생하는 전기장의 세기 E 가 변동하게 된다.

2.3 실험 장치 및 실험 결과

2.3.1 연산 증폭기 설계

센서에서 나오는 출력은 상용으로 이용하기에는 매우 작은 값이므로 연산 증폭기를 이용하여 Fig. 2와 같은 신호 증폭단을 설계한다.

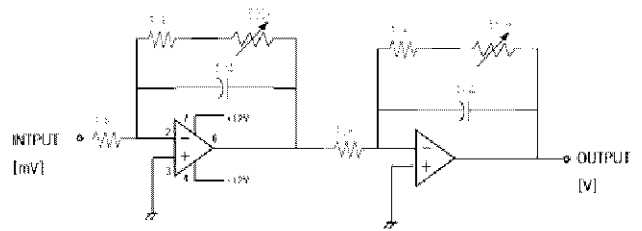


Fig. 2 The circuit of OP Amp.

설계된 신호 증폭단의 전달함수를 구하기 위해 먼저 첫 번째 연산 증폭기의 A 부분에 대한 임피던스를 구한다.

A부분의 임피던스는 저항과 콘덴서의 병렬연결이므로 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_f} + CS = \frac{1 + R_fCS}{R_f} \tag{3}$$

식 (3)은 식(4)와 같이 정리될 수 있다.

$$Z = \frac{R_f}{1 + R_fCS} \tag{4}$$

Fig. 2에서 주어진 입력 e_1 에 대한 첫 번째 연산 증폭기에서의 출력 e_2 까지의 관계를 구하면 식 (5)와 같다.

$$e_2 = - \frac{R_f}{R_i} \frac{1}{1 + R_fCS} e_1 \tag{5}$$

동일한 구조를 가진 두 번째 연산 증폭기에서의 입력 e_2 에 대한 출력 e_3 까지의 관계는 식(6)과 같다.

$$e_3 = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + R_2 CS} e_2 \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)에서의 관계를 통해 신호 증폭단에서의 입력 e_1 에 대한 출력 e_3 까지의 관계는 식 (7)와 같이 나타낼 수 있다.⁸⁾

$$e_3 = \frac{R_1}{R_1} \frac{R_2}{R_2} \frac{1}{1 + R_1 CS} \frac{1}{1 + R_2 CS} e_1 \quad (7)$$

따라서, 신호 증폭단은 두 번의 반전을 통하여 비반전 신호가 출력되며, 가변저항을 통하여 신호 증폭단의 증폭율을 4배에서 2704배까지 조절 가능하다.

여기서, $R_{f1} = R_{f2} = 10k + 500k V_r \Omega$, $V_r = 0 \sim 1$, $R_{i1} = R_{i2} = 10k\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 이다.

실험에 사용하게 될 홀 효과 센서는 5mV/G의 감도를 가지고 있다. 따라서, 실험에서 센서의 출력을 측정하기 위해서는 가변저항의 값을 조정, 증폭율을 50배로 결정한다.⁹⁾

2.3.2 실험 장치

본 연구에서 사용하는 홀 효과 센서는 Allegro사의 3515로써 전류계측장치나 자성체와의 거리를 측정하는 곳에 사용되어지는 선형 홀 효과 센서이다. 해당 소자의 경우, 제품의 사용조건에 의해 측정하고자 하는 물체가 자기장을 가지고 있는 형태여야만 한다. 하지만, 능동 자기베어링 시스템에서 사용되는 부상축은 자성체가 아니기 때문에 해당 홀 효과 센서를 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 소형 영구자석을 홀 효과 센서 표면에 부착시켜 임의로 자기력선을 생성한다.

Fig. 3은 실험장치의 전체도이다. 실험장치는 4개의 나사봉과 지지대, 상측 센서 고정단 ①, 하측 센서 고정단 ②, 측정물 고정단 ③, 연산 증폭단 ④ 및 전원 ⑤로 이루어져 있다.

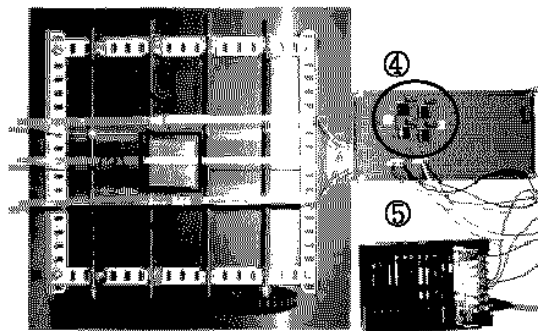


Fig. 3 Experimental equipment

가운데 2개의 나사봉은 측정물 고정단의 움직임을, 바깥의 2개 나사봉은 센서 고정단의 움직임을 제어하고, 고정단의 경우 톱니바퀴의 회전에 의해 발생하는 나사산 피치의 이송거리를 이용한다. 본 연구에서 사용한 나사봉의 피치는 1mm이고, 측정 시 나사봉에 연결된 기어를 1/4 바퀴씩 회전시켜 0.25mm의 이송거리를 만들어 냈다.

2.3.3 실험 결과

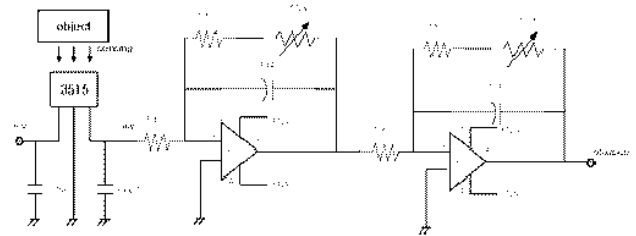


Fig. 4 An outline of experiment system

Fig. 4는 전체 회로에 대한 계략도이다. 측정물의 변동에 의한 센서 출력을 신호 증폭단을 거쳐 출력한다.

본 실험에서는 실제 제작된 변위 측정 장치의 정적, 동적 실험을 통해 변위 센서로서의 가능성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

2.3.3.1 정적실험

본 연구에서는 정적 실험을 하기 위하여 Fig. 3에서 언급한 실험장치를 통해 측정물 고정단의 움직임에 대한 센서 출력과 연산 증폭기를 거친 이후의 출력을 계측하였다.

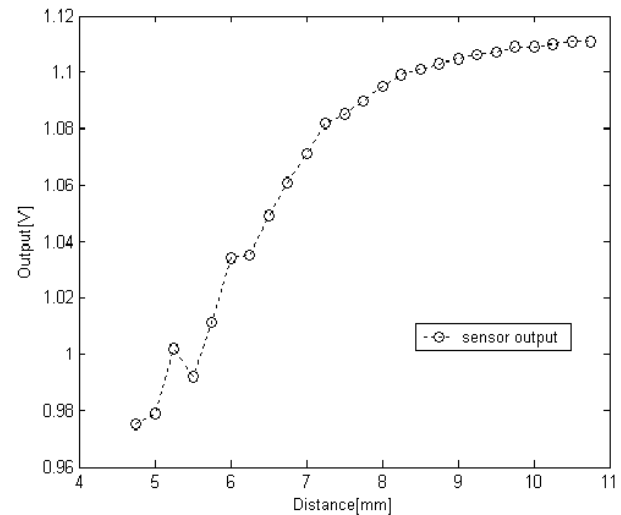


Fig. 5 The output of hall effect sensor

Fig. 5는 측정물 고정단의 움직임에 대한 센서 출력을 나타내고 있다. 측정 곡선은 S자 곡선을 그리고 있는데 이는 센서부에서 발생하는 자계가 거리의 제곱에 반비례한 특성을 나타내고 있기 때문이다.

제작의 용이성, 기계적인 구속조건 등을 고려하여 향후 제작하게 될 능동자기베어링 시스템의 부상축과 전자석 간의 공극은 정상상태 때 0.6mm이고, 이때 상측 혹은 하측으로 부상축이 이동 가능한 거리는 0.4mm이면 충분하다. 따라서, 홀센서를 변위측정센서로 사용하게 될 범위는 0.6 ± 0.4 mm이다.

Fig. 5로부터 홀센서를 변위 측정 센서로서 사용하기 위한 범위를 선정하면, 출력전압은 구배가 크면서도 선형성을 나타내는 1.04V에서 1.10V까지이며, 이때 홀센서의 변위는 6.25mm에서 7.25mm로 선형구간이 1mm정도로 제작하고자 하는 능동자기베어링시스템의 부상축 가동범위인 ± 0.4 mm(절대치 0.8mm)보다 큰 영역을 포함하므로 변위측정용 센서로서 충분히 사용할 수 있다.

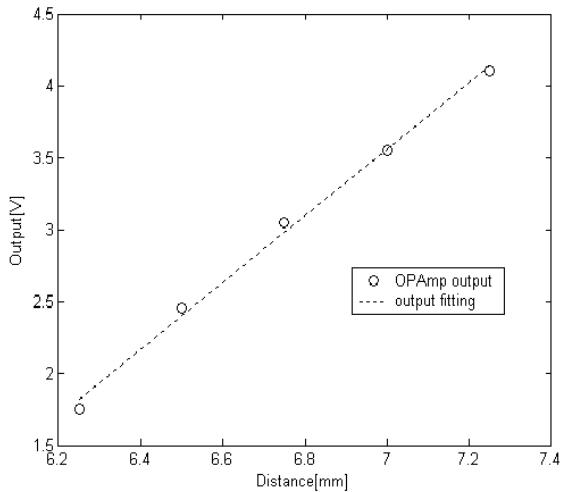


Fig. 6 The output of OP Amp. circuit

Fig. 6은 연산증폭기를 거친 센서의 출력과 출력값을 근사화 한 값을 나타낸 그림이다. 홀센서의 측정범위를 6.25mm에서 7.25mm로 한정하였으며, DAC (Digital to Analog Converter)의 입력범위에 맞도록, 센서의 출력 전압값에 -1V의 바이어스를 걸고 이 값을 50배 증폭하였다.

이렇게 구한 연산증폭기의 출력값은 식(8)과 같은 1차의 선형식으로 근사화 할 수 있다.

$$Y_{AMPout} = 2.32x_{distance} - 12.68 \quad (8)$$

변위 측정 장치로부터 정적실험을 행한 결과 변

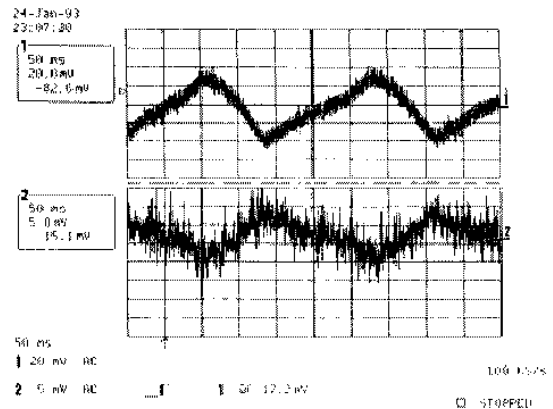
위측정센서로서 홀효과센서를 능동자기베어링 시스템에 설치하기 위해서는 부상축과 홀센서 간의 거리를 전자석에 비해 5.65mm 떨어지도록 설치하여야 하며, 연산증폭기를 거친 센서의 출력이 0V에서 5V사이의 값을 가지도록 바이어스를 걸고, 센서 출력 전압값을 증폭하여야 한다는 것을 알 수 있다.

2.3.3.2 동적실험

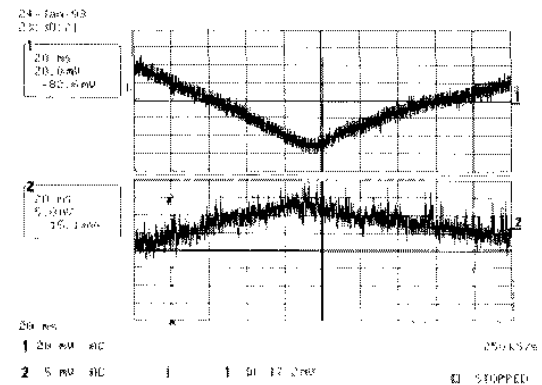
센서의 동특성을 확인하기 위하여 센서 입력을 임의로 변동시켰을 경우의 응답을 구해보았다.

동특성을 확인하기 위한 실험장치는 Fig. 3의 상태에서 하측 센서 고정단 ②를 제거하고, 대신 LB-1000이라는 K사의 레이저 변위센서와 홀효과 센서를 동시에 설치하여 실험을 행하였다.

Fig. 7 (a)는 측정물 고정단이 약 5Hz로 진동할 경우의 홀 효과 센서와 광학식 센서의 출력을 측정 한 것이다. 여기서 1번 채널은 홀 효과 센서의 출력이며, 2번 채널은 레이저의 출력이다. 양 센서의 위치가 측정물 고정단에서 각각 반대의 위치에 설치되어 있기 때문에 출력이 서로 반전되어 나타났다.



(a) sensor output



(b) zoomed sensor output

Fig. 7 The output of hall effect and laser sensor

Fig. 7 (b)는 Fig. 8 (a)에서의 실험 결과를 확대하여 나타낸 것으로 양 센서에서의 출력 간에는 노이즈의 크기에 대한 차이만 있을 뿐, 만족할 만한 성능을 기대할 수 있었다.

3. 결 론

능동 자기베어링 시스템에서의 변위 측정은 시스템 본래의 불안정성을 제어하기 위하여 반드시 필요한 작업이다. 이러한 능동 자기베어링 시스템을 보다 싼 가격으로 구현하기 위해서는 빠른 응답을 기대하면서도 저렴한 변위 측정 센서가 필요하며, 이러한 목적에 부합되는 센서가 홀 효과 센서이다.

본 연구에서는 이러한 홀 효과 센서에 대한 기본적인 이론과 함께 현재 다른 용도로 사용되고 있는 Allegro 사의 3515 소자를 변위센서로서 사용하기 위하여 영구자석을 홀 효과 센서 표면에 부착하였으며, 구성된 변위측정 실험 장치를 통해 정적인 실험과 동적인 실험을 하였다. 그 결과, 향후 본 연구실에서 개발하고자 하는 능동 자기베어링 시스템에서의 변위 측정 센서로서 홀 효과 센서의 가능성을 확인하였다.

참고 문헌

1. 권계시, 정호섭, 이종원, 1995, "전류 신호를 이용한 능동 자기 베어링의 제어", 한국소음진동공학회지, 제5권, 제1호, pp. 49~57.
2. 노명규, 정민경, 2001, "자기베어링용 유도형 위치 센서의 성능에 미치는 와전류와 히스테리시스의 영향", 대한기계학회, 춘계학술대회논문집 B, pp. 36~41.
3. 안형준, 장인배, 한동철, 1997, "초정밀 측정용 정전용량 변위센서에 관한 연구" 한국정밀공학회지, 제14권, 제11호, pp. 110~117.
4. 김창화, 양주호, 1996, "인덕턴스 특성을 이용한 자기 부상계의 변위 측정의 한 방법에 관한 연구", 한국소음진동공학회지, 제6권, 제3호, pp. 362~375.
5. 장인배, 한동철, 1995, "캐패시턴스형 센서가 내장된 자기베어링 시스템의 작동성능에 관한 연구" 대한기계학회논문집, pp. 2082~2088.
6. 정민경, 노명규, 2001, "자기베어링용 유도형 위치 센서의 성능에 미치는 와전류와 히스테리시스의 영향" 대한기계학회 춘계학술대회, pp. 36~41.

7. 김창화, 정병건, 양주호, 1998, "자기부상계의 센서리스 실현에 관한 연구", 한국소음진동공학회지, 제8권, 제1호, pp. 195~203.
8. 이동주, 홍준희, 박종권 역, 2001, "자기 베어링의 기초와 응용", 시그마프레스, 서울, pp. 52~55.
9. Allegro, 2004, "Ratiometric, linear hall effect sensor for high temperature operation" Allegro, Massachusetts USA, pp. 1~10.