

자기 베어링 기술을 이용한 유도형 변위센서 개발

노명규#, 박병철*, 노승국**, 경진호**, 박종권**

Development of an Inductive Position Sensor Using Magnetic Bearing Technology

Myounggyu Noh #, Byung Chul Park*, Seung Kuk Ro**, Jin Ho Kyung**, Jong Kwon Park**

ABSTRACT

In this paper, a development of an inductive position sensor is described. The sensor is similar to a radial magnetic bearing in that the sensor stator is shaped like a heteropolar magnetic bearing and is driven by a switching amplifier. A demodulation filter extracts the gap information from the switching current ripples. A prototype sensor exhibits the resolution of 0.43 μ m and the dynamic bandwidth of about 800Hz. The dynamic performance can be improved by increasing the switching frequency. However, the eddy current effects become noticeable at high switching frequency, thus limiting the improvement of the bandwidth.

Key Words : Inductive Position Sensor(유도형 위치 센서), Hysteresis(히스테리시스), Eddy Currents (와전류)

기호설명

- H** = magnetization vector of the core
- H_g** = magnetization vector of the air gap
- ϕ** = magnetic flux
- v** = voltage vector
- i** = coil current vector
- μ_0** = permeability of free space ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)
- μ_r** = relative permeability of core
- A** = pole face area
- f_s** = switching frequency
- L** = inductance
- N** = coil turns

1. 서론

능동자기베어링은 자성체의 불안정성을 해결하기 위해, 부상체의 위치를 측정하여 제어기로 하여금 적절한 제어력을 발생하도록 하는 되먹임 제어가 필요하다. 자기 부상체의 위치를 측정하기 위한 센서로는 와전류형 센서가 가장 많이 사용되는데, 높은 가격으로 말미암아 경제적인 자기베어링 시스템을 구성하는데 어려움이 있다. 고가의 센서는 또한 고장허용작동(Fault-tolerant operation)을 실현하는데 걸림돌이 된다. 고장허용작동을 위해 널리 사용되는 방법으로 여분의 센서를 사용하면 센서 일부의 고장 시에도 나머지 센서로 정상

접수일: 2003년 5월 26일, 게재승인일: 2004년 1월 9일
 # 교신저자, 충남대학교 메카트로닉스공학과
 Email mnoh@cnu.ac.kr Tel. (042) 821-6877
 * 충남대학교 대학원 메카트로닉스공학과
 ** 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

적인 작동이 가능하도록 할 수 있기 때문이다.

본 연구의 목표는 와전류형 센서의 대안으로 자기베어링 시스템에 적용 가능한 유도형 변위 센서를 개발함에 있다. 유도형 변위센서는 와전류형에 비해 작동원리가 간단하여 비교적 저렴한 가격으로 제작이 가능하다¹. 본 연구에서는 자기베어링 기술을 활용하여 유도형 센서를 개발함으로써 비용 절감뿐만 아니라 고장허용작동을 시도할 수 있는 설계가 가능하게 되었다. 유도형 센서는 자체측정 자기베어링^{2,3} 기술을 적용하여, 스위칭 증폭기가 센서 코일을 구동하고 코일 전류와 전압을 통해 회전체의 위치를 측정하게 된다.

본 논문에서 기술하는 유도형 센서는 센서 코일이 감긴 고정자와 센서 코일에 스위칭 전압을 인가하는 증폭기 그리고 전류와 전압 신호로부터 위치를 추정하는 신호처리 회로로 이루어져 있다. 센서 고정자는 반경방향 자기베어링의 형상과 비슷하고, 재료 및 제작과정 또한 동일하다.

고주파의 스위칭 증폭기에 의해 센서가 구동되므로, 센서는 와전류에 영향을 받게 된다. 와전류의 영향은 센서의 주파수 대역폭과 정밀도를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 유도형 센서의 주파수 대역폭을 향상 시키기 위해서는 스위칭 주파수를 증가시키는 것이 필요하다. 하지만 높은 스위칭 주파수는 와전류의 증가를 초래한다. 또한, 정밀도 향상은 주파수 대역 증가의 제한 요소로 작용한다. 따라서, 최적의 정밀도와 주파수 대역폭을 결정하기 위해서는 유도형 센서의 와전류의 영향을 포함하는 유도형 센서의 적절한 모델이 있어야 한다.

본 논문에서는 와전류 영향을 포함하는 비선형 자기회로이론을 이용하여 와전류가 유도형 센서의 성능에 미치는 영향을 살펴 보았다.

2. 스위칭 증폭기를 이용한 유도형 변위 센서의 작동 원리

Fig. 1 과 같은 공극을 가진 회로에서 철심의 투자율(permeability)이 무한대라고 하면 회로의 인덕턴스는

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{2g} \quad (1)$$

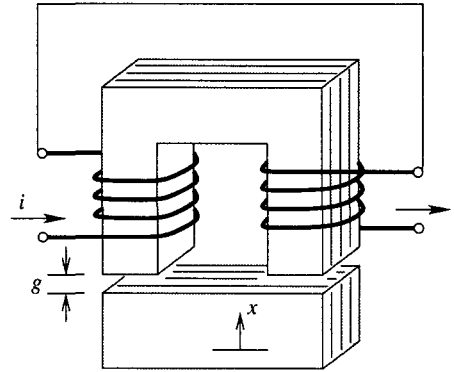


Fig. 1 Schematic of one-dimensional inductive sensor

로 구해진다. 코일에 인가되는 전압과 전류의 관계는 코일 저항에 의한 전압 강하를 무시하면

$$V \approx L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

이며 고주파의 스위칭 전압이 코일에 인가되는 경우, 전류 파형의 스위칭 잡음은

$$\Delta i = \frac{V}{L} \Delta t = \left(\frac{V}{\mu_0 N^2 A f_s} \right) g \quad (3)$$

로서 공극에 비례한다. 여기서, f_s 는 증폭기의 스위칭 주파수이다. 따라서, 전류 파형의 스위칭 잡음과 전압을 측정하여 공극의 크기를 추정할 수 있다.

3. 유도형 센서의 설계

본 논문에서 기술하고 있는 유도형 센서는 고정자, 증폭기, 신호처리회로로 구성되어 있다. 센서의 고정자는 자기베어링의 고정자와 동일한 방식으로 설계, 제작된다. 즉, 고정자는 0.35mm 의 두께를 가지는 규소강판을 적층하여 만들어진다. 고정자는 모두 16 개의 극을 가지고 있는데, 이들 16 개의 극은 네 개의 그룹으로 나누어지며, 각 그룹은 따라서 네 개의 극을 가지고 있다. 각 그룹의 네 개의 극에 감겨 있는 센서 코일은 직렬

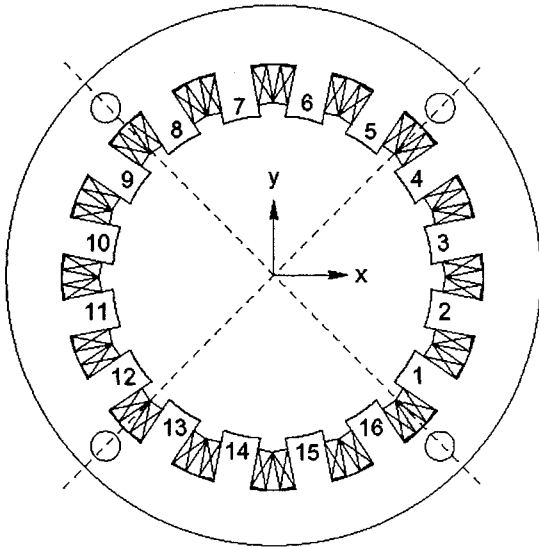


Fig. 2 Schematic of the sensor stator

로 연결되어, 네 개의 극에 걸친 공기 간극의 평균값을 측정하게 된다. Fig. 2 는 고정자의 개략 도를 보여준다.

센서의 증폭기는 자기베어링 시스템에 일반적으로 쓰이는 스위칭 전류 증폭기와 기본적으로 같다. 일반적인 상용 유도형 센서의 경우 정현파가 신호 변조에 사용된다. 그러나, 센서의 감도를 향상시키기 위해 큰 전류가 요구되는 경우, 고전력 정현파를 발생하기 위한 선형 증폭기가 필요하게 되며, 이는 센서의 가격 상승을 가져올 뿐만 아니라 센서의 소형화에도 걸림돌이 된다. 본 연구에서는 센서 코일을 구동시키기 위해 상용으로 손쉽게 구할 수 있는 PWM 스위칭 증폭기 집적회로 (National Instrument LMD18200)를 이용하여 간단하게 센서 증폭기를 구현하였다. 증폭기는 (+)의 전압과 (-) 전압의 시간 간격이 동일하도록, 즉, 듀티비(duty ratio)가 50%가 되도록, 디지털 발진회로에 의해 구동 된다.

신호처리회로는 전류센서(current transducer)와 복조필터(demodulation filter)로 구성되어 있다. 전류센서는 스위칭 전압에 의한 코일 전류를 측정한다. 코일 전류는 Noh^4 에서 설명된 방법과 유사하게 처리되지만, 스위칭 전압이 고정 듀티비를 가지고 있기 때문에 Noh^4 에서와 같은 parameter estimation 방법을 사용하지 않은 간단한 구조로 구현되었다.

복조 필터는 고역통과필터(high-pass filter), 전파정류기(full-wave rectifier), 저역통과필터(low-pass filter)로 이루어져 있다. 우선 고역통과 필터에서는 위치정보와 관계없는 저주파 잡음을 없애준다. 전파 정류기와 저역통과필터의 조합은 코일 전류의 스위칭 잡음으로부터 위치 정보를 추정한다. 신호 대 잡음 비율(signal-to-noise ratio)을 향상시키기 위해, 서로 반대편에 있는 두 개의 센서 출력의 차이를 각 축의 위치 추정값으로 구하는 차동 방법(differential operation)을 채택하였다. Fig.8 은 신호처리회로의 구조를 설명하고 있다.

4. 센서의 성능

앞 절에서 기술한 바와 같이 센서를 설계한 후 제작된 센서의 제원은 다음과 같다. 센서 고정자는 0.35mm 두께의 규소광판 10 장을 적층하여 만들어졌으며, 센서 고정자의 외경과 내경은 각각 70mm 와 44mm 이다. 센서 고정자는 모두 16 개의 극을 가지고 있으며, 각 극의 권선수는 80, 공기간극은 0.25mm 이다. 센서 코일은 20kHz 로 스위칭하는 48V 전압에 의해 구동 된다. 신호처리 회로에서 고역통과필터로는 4.08kHz 의 cut-off 주파수를 갖는 2 차 butterworth 필터가 사용되었다. 저역통과필터는 1.59kHz 의 cut-off 주파수를 갖는 2 차 butterworth 필터가 사용되었다.

센서의 성능을 평가하기 위해 정적 성능 시험과 동적 성능 시험을 수행하였다. 센서의 정적 성능은 x-y 테이블을 이용하여 측정 대상체를 음

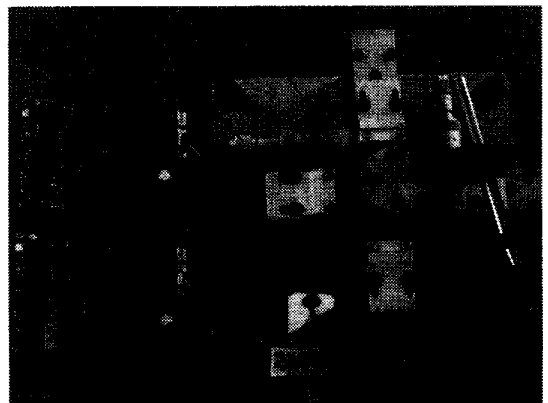


Fig. 3 Experimental setup

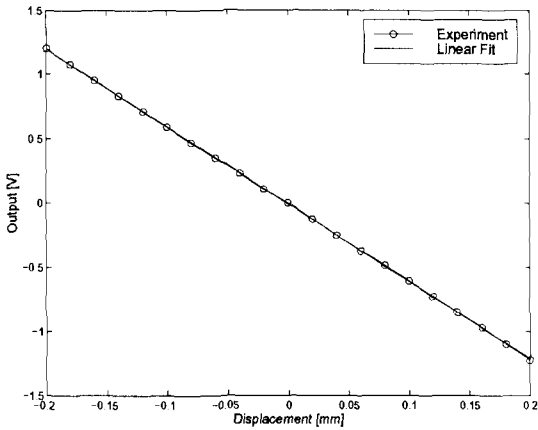


Fig. 4 Static sensor output

직이고, 이 때 센서의 출력을 와전류형 센서 출력 신호와 비교함으로써 수행하였다. Fig. 3 은 PCB 로 제작된 센서 회로와 정적 성능 실험장치의 구성을 보여준다.

Fig. 4 는 센서의 정적 성능 실험 결과를 보여 준다. 센서 출력은 충분한 선형성을 가지고 있으며, 측정 범위 -0.2mm 에서 $+0.2\text{mm}$ 내에서, 최대선형오차는 0.5% 미만이다. 신호 대 잡음 비율은 59dB 로 측정되었는데, 이것은 $0.43\mu\text{m}$ 의 분해능을 보장한다. 센서 출력에 내재한 잡음은 대부분이 스위칭 잡음 중 필터링 되지 않은 부분에서 기인한다. 따라서, 신호 처리 회로에서 보다 높은 차수의 필터를 사용하던지, 필터의 cut-off 주파수를 낮춤으로써 센서의 분해능이 향상될 수 있다. 센서는 각 방향에서 4 개 극의 평균 간극의 크기를 측정하기 때문에, x 와 y 방향 사이의 약간의 간섭을 예상할 수 있다. 측정범위에서 각 방향간의 간섭량은 1% 이하의 결과를 얻었다.

센서의 동특성을 평가하기 위해 센서의 주파수 응답을 측정하였다. 측정방법으로 자기베어링 시스템에서 자기베어링을 가진기로 사용하여 일정한 주파수로 회전축을 가진하고, 그에 따른 센서 출력을 기준센서(와전류센서)와 비교하여 크기와 위상차를 측정하였다. Fig. 5 는 실험 결과로 얻은 주파수 응답이 시뮬레이션 결과와 비교되어 있다. 시뮬레이션 결과는 다음 절에서 기술하는 센서의 자기회로 모델을 이용하여 얻어졌다. 측정 결과로부터, 센서의 위상 대역폭이 약 800Hz 임을

알 수 있는데, 주파수 대역폭을 향상시키기 위해서는 스위칭 주파수를 증가시킴으로써 간단히 해결할 수 있다. 하지만 높은 스위칭 주파수로 인해 와전류의 영향이 더 커지게 되어 센서의 감도에 영향을 미치게 된다. 와전류의 영향은 다음 절에서 자세히 다루어 진다.

Fig. 6 은 본 논문에서 기술하는 센서를 사용하여 자기부상을 구현한 실험결과이다. 두 개의 반경방향 자기베어링과 하나의 축방향 자기베어링에 의해 부상되는 터보 분자 펌프가 6600rpm 으로 회전할 때 회전 궤적은 Fig. 6 에 나타나 있는 바와 같이 $10\mu\text{m}$ 이내의 크기를 가진다. 회전축은 보조베어링에 의해 구속되는 반경 $100\mu\text{m}$ 의 진동 여유 공간을 가지고 있으며, 따라서 유도센서에 의해 자기베어링이 회전축의 진동을 제어하고 있음을 알 수 있다.

5. 와전류에 의한 영향

위치센서의 성능은 정적 성능을 대표하는 민 감도와 동적 성능을 정의하는 응답속도에 의해 결정된다고 할 수 있다. 성능을 평가하는 이 두 가지 지표에 영향을 끼치는 중요변수는 변조(스위칭)주파수이다. 복조필터에서 저역통과필터의 cut-off 주파수의 최대값은 스위칭 주파수의 1/10 정도이다. 센서의 응답속도는 저역통과필터의 cut-off 주파수와 직접적인 관련이 있다. 즉, 저역통과필터의 cut-off 주파수를 높이면, 센서의 응답속

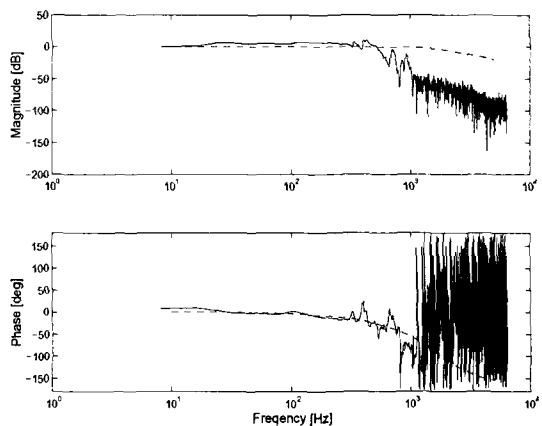


Fig. 5 Frequency response of the sensor (simulation and experiment)

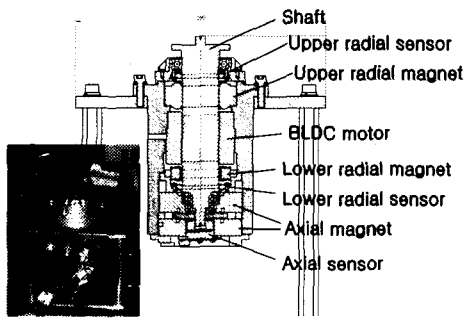
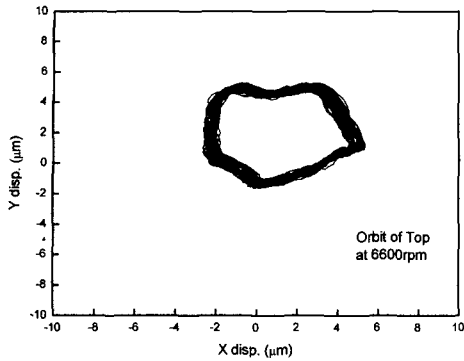


Fig. 6 Magnetic bearing system and the loci of shaft running at 6600 rpm

도는 향상될 수 있다. 그러나, 이는 센서의 정적 민감도를 저하시키는 결과를 초래한다. 또한 와전류의 영향으로 인해 민감도의 감소폭은 더욱 더 커지게 된다. 그러므로 최소한의 정적 민감도를 보장할 수 있는 최대 스위칭 주파수를 찾는 것이 필요하다.

와전류를 포함하는 유도형 센서의 모델은 이런 목적에서 사용될 수 있다. 자기베어링에서 자성재료의 히스테리시스 및 와전류가 베어링 성능에 미치는 영향을 고려하기 위한 자기회로모델은 이미 개발되어졌다⁵. 본 논문의 유도형 센서는 반경방향 자기베어링과 동일한 자기회로 형태를 가지고 있기 때문에 센서의 정적 민감도에 있어서 와전류에 의한 영향을 조사하기 위해 Noh⁵ 와 동일한 방법을 사용하여 와전류의 영향을 포함한 센서의 모델을 유도할 수 있다.

센서의 자기회로 모델은 다음과 같은 비선형 행렬 방정식으로 간략히 기술될 수 있다⁴.

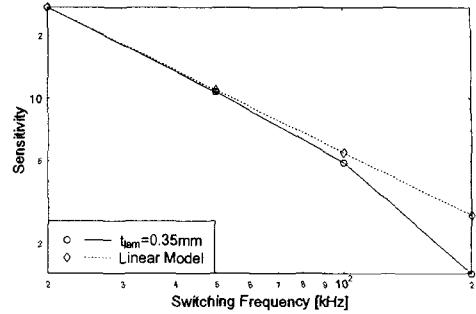


Fig. 7 Sensitivity change with respect to switching frequency

$$\phi = F(\mathbf{H}, \mathbf{H}_g, \mathbf{v}) \quad (4)$$

$$\mathbf{i} = G(\mathbf{H}, \mathbf{H}_g, \mathbf{v}) \quad (5)$$

여기서 ϕ 는 모든 자속 경로(총 48 개; 16 개의 극 경로, 16 개의 고정자 경로, 16 개의 회전자 경로)에서의 자속을 포함하는 자속 벡터이다. 그리고 전류 벡터 \mathbf{i} 는 각 코일에 흐르는 전류로 이루어진다. 공기간극 자화 벡터 \mathbf{H}_g 는 다음과 같이 결정된다.

$$\mathbf{H}_g = \frac{1}{\mu_0 A} \phi$$

그리고 코어(고정자 및 회전자)에서의 자화 벡터 \mathbf{H} 는 다음과 같은 비선형 방정식에 의해 자속 벡터와 관계가 기술될 수 있다.

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r(\phi) A} \phi$$

여기에서 상대투자율 $\mu_r(\phi)$ 는 히스테리시스와 자기포화(magnetic saturation) 같은 비선형 특성을 포함하고 있다. 식 (4)과 (5)에서, 벡터 \mathbf{v} 는 각 코일에 인가되는 전압을 나타낸다.

와전류 효과는 자속경로에 감겨진 가상의 코일에 와전류가 발생된다는 가정으로 모델링할 수 있다³. 즉, 가상의 와전류 코일에 쇄교하는 자

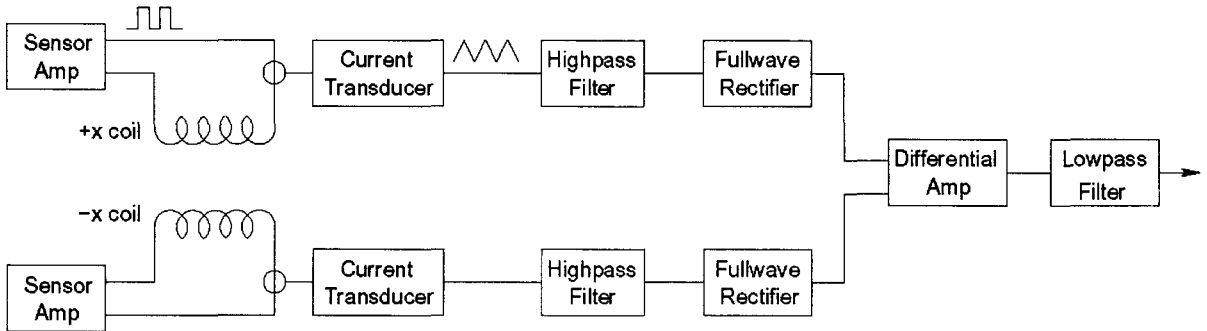


Fig. 8 Sensor signal processing circuit

속의 크기와 가상 코일의 전기저항 값이 추정되면, 와전류 효과는 근사적으로 모델링될 수 있다. 와전류 모델에 대한 유도과정은 Noh⁴ 에 자세히 기술되어 있다.

Fig 7 은 센서의 정적 민감도에 와전류가 미치는 영향을 보여주는 시뮬레이션 결과이다. 와전류가 고려되지 않으면 정적 민감도는 변조주파수가 증가함에 따라 선형적으로 감소한다. 그러나, 스위칭 주파수가 높아질수록 와전류의 영향에 의해 민감도의 감소가 가속화 됨을 알 수 있다. 따라서, 일정한 신호 대 잡음 비율을 보장하기 위한 최대 스위칭 주파수는 와전류의 영향을 고려하여야만 보다 정확하게 구할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 자기베어링 기술을 활용한 유도형 변위센서를 기술하였다. 개발된 변위센서는 0.43 μ m 의 분해능과 800Hz 의 주파수 응답 특성을 가지는 것으로 측정되었다. 이러한 변위 센서는 다양한 목적으로 사용될 수 있다. 그러나, 고속 회전축의 변위를 측정하기 위해서는, 센서의 주파수 응답 특성이 개선되어야 한다. 예를 들어, 자기부상 터보 분자 펌프의 경우, 40,000rpm 정도의 회전 속도가 현재의 기술 수준인데, 이러한 회전축의 변위를 측정하려면, 센서의 응답속도는 2kHz 이상이 되어야 한다. 센서의 동적 성능을 개선하기 위해 센서 증폭기의 스위칭 주파수를 높일 수 있지만, 정적 민감도의 저하와 와전류의 영향을 고려하여야만 한다. 따라서, 주어진 센서의 성능 요구 조건에 따라, 적절한 민감도와 응답속도를

보장하는 최적의 스위칭 주파수 (혹은 변조 주파수)를 선택하여야 한다.

추후 연구과제로는 센서의 동적 특성을 향상시키는 동시에, 고장 허용 작동이 가능하도록 센서의 설계를 개선하는 것이다. 현재 네 개의 센서 코일이 한 축의 (+) 혹은 (-) 방향 변위를 감지하고 있는데, 이를 2 개의 코일씩으로 분리하면 센서 코일은 2 배의 중복성(redundancy)를 가지게 된다. 이러한 중복성과, 고장 감지 회로, 고장시 운전 모드 전환 장치 등을 활용한 고장 허용 작동에 관한 연구가 현재 진행 중에 있다.

참고문헌

1. Choi, D., Choi, I.M., Kim, S.H., "An Inductive Micro Position Sensing System and Analysis of its Response Characteristics," J. of KSPE, Vol. 18, No. 3, pp. 189-194, March 2001.
2. Noh, M. D. and Maslen, E. H. "Self Sensing Active Magnetic Bearings Based on Parameter Estimation," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 46, pp. 45-50, February, 1997.
3. Okada, Y., Matsuda, K. and Nagai, B., "Sensorless magnetic levitation control by measuring the PWM carrier frequency component," in Proceedings of the Third International Symposium on Magnetic Bearings, 1992.
4. Noh, M. D., "Self-Sensing Magnetic Bearings Driven by a Switching Power Amplifier," Ph. D. Thesis, The University of Virginia, 1996.
5. Noh, M, "A Model of Magnetic Bearings

Considering Eddy Currents and Hysteresis,”
International Journal of KSPE, Vol. 4, No. 3, pp. 5-11,
May, 2003.