자기회로 이론을 이용한 링형 다극 유도형 변위센서의 모델링

김지미*(중남대 메카트로닉스공학과 대학원), 노명규(중남대 메카트로닉스공학과)

Modelling of a Ring-type Multi-pole Inductive Position Sensor Using Magnetic Circuit Theory

Myounggyu Noh, Jimi Kim

ABSTRACT

The performance of an inductive position sensor has approved by previous research papers. In this paper, magnetic circuit model of a ring-type multi-pole inductive position sensor is described. The magnetic circuit model is required to design inductive position sensor as well as draw a fault tolerance algorithm. Using the magnetic circuit theory, we derived the relationship between voltage applied and flux density in the normal air-gap. By idealizing the modulation/demodulation processes of signal processing circuit, sensor gain with respect to change of displacement is theoretically calculated. We present the results obtained by computer simulation, experiments and mathematical calculation using the magnetic circuit model, which validate the theoretical derivation.

Key Words : Inductive Position Sensor(유도형 변위센서), Magnetic Circuit Model (자기회로모델)

1. 서론

능동자기베어링은 비접촉 지지에 의한 마찰력의 감소로 고속운전을 가능하게 하며 진공 상태에서도 동작이 가능하도록 한다. 그러나 특히 고속 운전시에 두드러지는 자성체의 불안정성을 해결하기 위해서는 부상체의 위치를 측정하여 제어기로 하여금 적절한 제어력을 발생하도록 하는 되먹임 제어가 필요하다. 자기 부상체의 위치를 측정하기 위한 센서로는 고정밀도의 와전류형 센서가 가장 많이 사용되는데, 높은 가격과 제어기, 센서부, 증폭기 등 그 밖의 구성요소가 필요하기 때문에 경제적인 자기베어링 시스템을 구성하는데 어려움이 있다. 이는 또한 전체 시스템의 신뢰도를 떨어뜨려 고장허용작동(Fault-tolerant operation)을 실현하는데 걸림돌이 된다. 고장허용작동은 센서의 일부가 올바른 작동을 하지 않을 시에 여분의 센서를 사용하여 자기베어링 시스템이 정상적으로 작동하게 한다.

유도형 센서는 비교적 작동원리가 간단하여 제작이 용이하고 경제적인 이점을 갖는다. 그러한 이유로 와전류형 센서의 대안으로 자기베어링 시스템에서의 활용도가 높아지는 추세이다.

본 논문에서는 링 형태의 다극 유도형 변위 센서를 자기회로 모델을 이용해 설계하는 방법을 기술하였다. 시스템의 요구 사항에 부합하는 최적의 센서를 설계하기 위해서는 일반화된 모델이 필요하다. 이러한 점에서 센서의 자기회로 모델은 필수적이며 센서 고장 허용 알고리즘을 도출하는데도 반드시 필요하다. 제시된 유도형 센서는 여러 극을 하나의 독립코일로 직렬 연결하여 총 4 개의 그룹을 이루게 된다. 마주보는 두 독립코일의 출력의 차이를 이용해 정확한 변위를 측정함으로써 신호대 잡음 비율을 높일 수 있을 뿐 아니라 대상체의 변위를 평균화된 값으로 출력하게 되므로 대상체의 표면이 균일하지 않더라도 측정이 가능하다는 장점

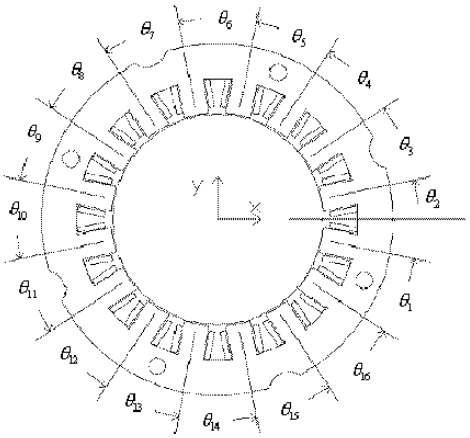

Fig. 1 유도형 센서

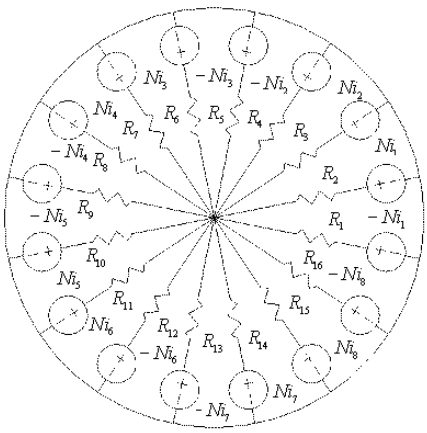

Fig. 2 유도형 센서의 자기회로모델

을 갖는다. 일반적인 유도형 센서를 모델링 하기 위해 와전류와 히스테리시스 등의 비선형 효과들을 무시하고 자기회로 이론을 이용하여 단순하게 모델링 하였다 자기회로 이론을 통해 공극의 자속밀도와 전류, 전압의 관계를 유도하였으며 신호 처리 회로의 변조, 복조 과정을 이상화하여 변위에 따른 센서 이득을 이론적으로 도출하였다. 이론적 결과는 유한 요소 해석 결과와 실험을 통해 검증하였다.

2. 자기회로 모델

자기회로 모델은 자기회로 이론에 기초하여 자성체 시스템을 등가의 자기회로로 표현한다. 기술하고 있는 유도형 센서의 경우 대상체의 변위를 검출함에 있어 센서의 외형이 달라질 때마다 센서의 출력이 달라지게 되므로 요구된 성능을 만족하는 센서를 설계하기 위해서 자기회로 모델이 반드시 필요하다.

Fig.1 은 링형 다극 유도형 센서의 개략도로 총 16 개의 극을 갖는다. 기본적인 원리는 대상체와의 거리가 달라짐에 따라 바뀌는 코일의 인덕턴스를 측정하여 변위를 검출하는 것이다. 4 개의 극당 하나의 독립코일이 감겨져 있고 마주보는 두 독립코일의 인덕턴스 출력 값을 빼 주어 기준으로부터의 변위를 알 수 있게 한다. 총 4 개의 독립 코일이 있으므로 2 개의 센서 출력 값을 얻게 된다

각 극에 흐르는 Magnetic Flux 는 입력 전류와 직접적인 관계가 있다. 입력전류와 코일에서 발생하는 인덕턴스의 관계식을 구하면 유도형 센서를 모델링 할 수 있다. 이를 위해 Hysteresis 와 Eddy-current, Fringing, Leakage 등과 같은 비선형적인 영향을 배제하고 추가로 코어의 자기저항을 무시하면 Fig.2 와 같이 모델링할 수 있다.

Fig.2 의 자기 회로 모델을 이용하여 입력 전류와 Magnetic flux 간의 관계식을 구하기 위해서는 Ampere's loop law 와 flux conservation 을 적용해야 한다.

우선 각 j 번째 극에서의 공극의 크기는 다음과 같다.

$$g_j = g_0 - x\cos\theta_j - y\sin\theta_j \quad \text{where, } \theta_j = \frac{\pi}{16}(2j-5) \quad (1)$$

각 loop 에서 공기 간극의 저항을 R_j 로, Magneto-motive force 를 Ni_j 로, magnetic flux 를 ϕ_j 라 하여 다음의 16 개의 식을 구할 수 있다.

$$R_j\phi_j - R_{j+1}\phi_{j+1} = Ni_j - Ni_{j+1} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{16}\phi_j = 0 \quad (3)$$

위에서 구한 식들을 행렬로 표현하면,

$$\Phi = R^{-1}N_1 I \quad \text{이 된다.} \quad (4)$$

이 때 R 행렬과 N_1 행렬은 다음과 같다.

$$R = \frac{1}{\mu A}\begin{bmatrix} g_1 & -g_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_2 & -g_3 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_3 & -g_4 & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & g_{15} & -g_{16} \\ g_0 & g_0 & g_0 & g_0 & & g_0 & g_0 & g_0 & g_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$N_1 = n\begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

(4)식에서 구한 입력전류와 magnetic flux 간의 관계식을 이용해 인덕턴스를 유도할 수 있다.

입력이 고주파로 주어질 때 전압방정식에서 코일 저항에 의한 전압강하는 무시 될 수 있으므로 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$V = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

여기서 N_2 는 각 극의 코일이 감긴 방향에 관한 행렬로 각 코일간의 간섭효과를 제거하기 위해 다른 코일 간의 인접한 극을 같은 극성으로 만들어 주었다.

$$N_2 = n\begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(4)를 식 (7)에 대입함으로써 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$V = N_2 R^{-1} N_1 \frac{dI}{dt} \quad (9)$$

인덕턴스는 전류의 시간에 따른 변화량과 인가되는 전압간의 비이므로 인덕턴스 행렬은 다음과 같다.

$$L = N_2 R^{-1} N_1 \quad (10)$$

$\pm V_s$ 의 전압이 스위칭 주파수 f_s 로 인가될 때 센서의 출력은 전류리플의 진폭에 비례하게 된다.

$$\Delta I = \Delta t L^{-1} V_s \quad (11)$$

$$\Delta I = \frac{1}{2f_s} L^{-1} V_s \quad (12)$$

전류 리플의 진폭의 크기는 신호처리 회로를 거쳐 dc 값으로 출력되며 원래 크기의 1/4 이 된다.

센서의 민감도(sensitivity)는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$S = \begin{bmatrix} s_{xx} & s_{xx'} & s_{xy} & s_{xy'} \\ s_{x'x} & s_{x'x'} & s_{x'y} & s_{x'y'} \\ s_{yx} & s_{yx'} & s_{yy} & s_{yy'} \\ s_{y'x} & s_{y'x'} & s_{y'y} & s_{y'y'} \end{bmatrix} \quad (s_{jk} = \frac{\partial v_j}{\partial k}) \quad (13)$$

각 방향의 출력을 x, x', y, y' 으로 편미분하여 S 행렬을 구할 수 있다. k 에 관해 편미분한 값을 행렬 미분 규칙에 따라 풀어주면 특정 위치에서 각 센서 출력의 민감도를 알 수 있다.

시간에 따른 x, y 축으로의 변위가 무시할 수 있을 정도로 작을 때 위치에 따른 R 행렬 값은 상수가 된다. 그러므로 입력전류가 주어지면 센서의 출력을 간단히 계산할 수 있다. 4 개의 독립 코일과 대상체의 거리가 균일하게 g_0 일 때의 인덕턴스 행렬은 다음과 같다.

$$L = \frac{4\mu_0 n^2 A}{g_0}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

L 행렬은 센서의 4 개의 독립코일에서 발생하는 인덕턴스로 위의 관계식을 이용하면 결정된 세 개의 설계 변수 - 각 극의 코일 감은 수와 센서 고정자의 극 면적, 대상체와의 거리에 따른 고정자의 내경 치수를 대입함으로써 설계된 센서의 출력을 쉽게 구할 수 있다.

3. 유도형 센서의 설계 및 제작

유도형 센서는 고정자, 증폭기, 신호처리회로로 구성되어 있다. 고정자(Fig.3)는 0.35mm 두께의 규소강판을 적층하여 만들어진다. 앞에서 기술한 바와 같이 고정자는 모두 16 개의 극을 가지고 있는데, 이들 16 개의 극은 네 개의 그룹으로 나누어진다. 각 그룹의 네 개의 극에 감겨 있는 센서 코일은 직렬로 연결되어, 네 개의 극에 걸친 공기 간극의 평균값을 측정하게 된다.

센서 코일을 구동시키기 위해 상용으로 쉽게 구할 수 있는 PWM 스위칭 증폭기 직접회로 (LMD18200)를 이용하여 간단하게 센서 증폭기를 구현하였다.

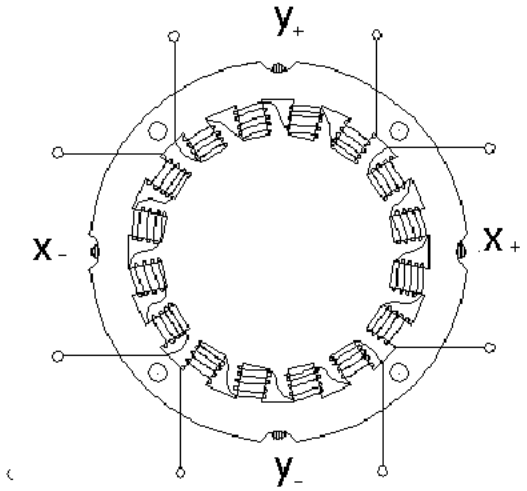

Fig. 3 유도형 센서의 개략도

증폭기는 듀티비 50%의 디지털 발진회로에 의해 구동된다.

신호처리회로는 전류센서와 복조필터로 구성되어 있다. 전류센서는 스위칭 전압에 의한 코일 전류를 측정한다. 신호처리 회로에서 전류의 변화량을 LEM 센서로 측정하여 복조 회로를 통해 위치 값으로 바꿔주게 된다. 복조 필터는 고역통과필터(high-pass filter), 전파정류기(full-wave rectifier), 저역통과필터(low-pass filter)로 이루어져 있다. 우선 고역통과 필터는 위치정보와 관계없는 저주파 잡음을 없애는 역할을 한다. 전파 정류기와 저역통과필터의 조합은 코일 전류의 스위칭 잡음으로부터 위치 정보를 추정하여 최종 센서 출력을 dc 값으로 출력한다. 신호 대 잡음 비율(signal-to-noise ratio)을 향상시키기 위해, 서로 반대편에 있는 두 개의 센서 출력의 차이를 각 축의 위치 추정값으로 구하는 차동방법(differential opertion)을 채택하였다.

신호 처리 회로에서 고역 통과 필터로는 4.08kHz의 cut-off 주파수를 갖는 2 차 butterworth 필터가 사용되었다. 저역통과필터는 1.59kHz 의 cut-off 주파수를 갖는 2 차 butterworth 필터가 사용되었다. 센서 출력은 충분한 선형성을 가지고 있으며, 측정 범위 -0.2mm 에서 +0.2mm 내에서, 최대선형오차는 0.5% 미만이다. 신호 대 잡음 비율은 59dB 로 측정되었는데, 이것은 0.43μm 의 분해능을 보장한다.

4. 자기회로 모델의 검증

자기회로 모델의 정확한 검증을 위해 세 가지의 방법으로 코일에 발생한 인덕턴스를 비교하였다. 첫째로 자기회로 모델을 이용하여 설계한 유도형 센서의 수학식(14)에 각 변수를 대입하여 인덕턴스를 계산하였다

$A = 18.9\times10^{-6} m^2$, $g_0 = 0.705\times10^{-3} m$, $n = 110$ 회이므로 계산결과 1.63mH 가 구해져야만 한다.

$$L = \frac{4\mu_0 n^2 A}{g_0} = 1.63mH$$

둘째로 자기장 해석 프로그램(FEMM)을 사용하여 인덕턴스를 측정한다. 0.1A 의 전류를 인가하였을 때 센서의 코일에 의해 발생하는 인덕턴스를 시뮬레이션 하였다. 적분을 통한 Magnetic field energy 를 이용해 인덕턴스를 계산한 결과는 Fig.5 와 같다.

$$W = \frac{1}{2}\int A\cdot J\, dV = \frac{1}{2}Li^2 \qquad (15)$$

$$L = \frac{\int A\cdot J\, dV}{i^2} = 2.31mH \qquad (16)$$

마지막으로 실험을 통해 인덕턴스를 측정하였다. 자기회로 모델을 검증하는 데 사용된 유도형 센서는 자기회로 모델을 기반으로 제작 된 것으로 실측결과, 센서 고정자의 외경은 70mm, 내경은 43.23 mm 이다. 각 극의 권선 수는 110 회, 공기간극은 0.705mm 이다. 센서 코일이 20kHz 로 스위칭하는 48V 전압에 의해 구동될 때 LRC meter 를 이용하여 인덕턴스를 측정하였다. 측정결과 3.2mH 가 발생하였다.

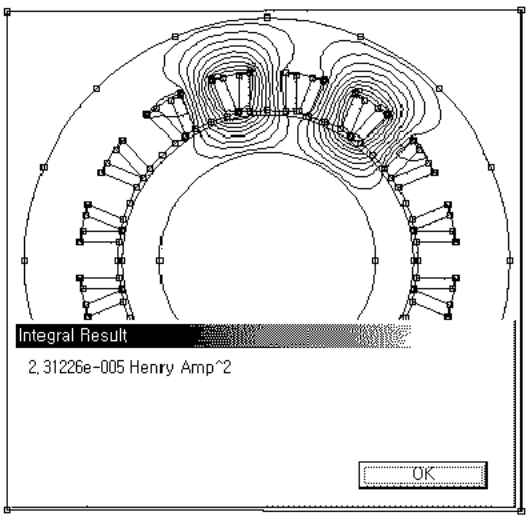

Fig. 4 FEMM 해석 결과

5. 고찰 및 결론

본 논문에서는 자기회로 모델을 이용한 링형 다극 유도형 센서의 모델링에 대해 기술하였다. 자기회로 이론을 이용해 도출한 입력 전류와 magnetic flux의 관계식을 전압 방정식에 대입하여 인덕턴스 행렬식을 유도하였다. 그 결과 센서의 세 가지 설계 요소를 결정지음으로써 요구된 성능을 만족시키는 센서를 설계할 수 있음을 확인할 수 있다.

본 논문의 검증 결과에서 볼 수 있듯이 검증 방법에 따라 오차가 발생하였는데 그 오차의 크기는 FEMM의 해석 환경이 2-D라는 점을 감안할 때 받아들일 수 있는 정도이다. 그러나 오차가 발생한 원인 규명을 위한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

유도형 변위 센서의 성능은 센서를 구동하는 고주파 신호의 주파수와 직접적인 관계가 있다. 고주파의 스위칭 증폭기에 의해 센서가 구동 되므로, 센서는 와전류에 영향을 받게 되고, 자성 재료의 비선형성 또한 센서의 동작에 영향을 미치게 된다. 그러므로 앞으로 와전류와 히스테리시스가 유도형 센서의 성능에 미치는 영향에 대한 평가가 이루어져야 하고 와전류를 포함하는 센서 재료의 자화 모델을 정립하는 것이 필요하다.

참고문헌

1. M. D. Noh, Self–Sensing Magnetic Bearings Driven by a Switching Power Amplifier. Ph. D. Thesis, The University of Virgnia, 1996.
2. M. D. Noh and M. K. Jung, “The Effects of Eddy Currents and Hysteresis on the Performance of Inductive Sensor for Magnetic Bearings”, in Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting B, 2001
3. Myounggyu Noh, M. K. Jeong, B. C. Park, S. K. Ro, J. K. Park, “Development of a low cost Inductive Position Sensor using Switching Noise Demodulation”, in Proceedings of the eighth International Symposium on Magnetic Bearings, 2002