

유도형 변위 센서의 전기 노이즈 분석과 센서 성능에 미치는 영향 고찰

신우철*, 홍준희⁺, 이동주⁺⁺

A Study on Analysis and Effect of Electronic Noise in an Inductive Displacement Sensor

Woo-cheol Shin*, Jun-hee Hong⁺, Dong-ju Lee⁺⁺

Abstract

Noise is a problem in many electronic circuits and active control system. Arising from spuriously coupled noise from other circuits, it corrupts the signal of interest and introduces an uncertainty into information it contains. In this paper, we have researched noise characteristics of the inductive displacement sensor which has been designed. we first present basic concept and characteristics of magnetic field-coupled noise in the sensor output signal. Then, we are present relation noise and sensor performances. Finally, we concentrate low noise design of a sensor driver and a signal detection circuit.

Key Words : inductive displacement sensor (유도형 변위 센서), magnetic field-coupled noise (자기장 커플 노이즈)

1. 서론

고속 고정도를 추구하는 최신 공작기계 기술동향에 따라 고성능 센서를 적용한 자동 제어 기술 도입이 늘어나고 있다. 한 예로서 자기 베어링 주축 시스템은 회전 주축의 비접촉 지지가 가능한 시스템으로서 실시간 모니터링에 의한 자동 제어를 통해 구현된다. 회전 주축의 실시간 모니터링은 일반적으로 다섯 개의 비접촉 변위 센서들을 이용하여 이루어진다. 이때, 센서 신호의 노이즈는 센서

측정 정도와 관계된다. 뿐만 아니라 센서가 외부 노이즈에 대한 내성이 부족하다면 노이즈가 자동 제어 시스템의 오작동을 유발시킬 수 있는 원인이 되기도 한다. 따라서 자동화 시스템에서 센서의 전기 노이즈 특성은 중요하다.

본 논문은 고속 고정도 유도형 변위 센서 설계에 관한 연구 과정으로서 시작품으로 제작된 센서의 출력신호에 나타나는 전기 노이즈 분석과 노이즈가 센서 성능에 미치는 영향을 고찰하고 노이즈를 억제하기 위한 설계 방법을 제시하고 있다.

* 주저자, 충남대학교 기계공학과 대학원 (swc@cnu.ac.kr)

주소: 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220 충남대학교 기계공학과

+ 충남대 기계공학과

++ 충남대 기계공학과

전기노이즈는 전달 경로에 따라 방사 노이즈와 전도 노이즈로 구분할 수 있다. 방사 노이즈는 주로 공기 중으로 방사되는 자기장, 전기장 그리고 전자기파 등이 시스템 내부의 전도체나 내부로 연결된 전선에 유도되어 시스템 내에 나타나게 된다. 전도 노이즈는 전기적 경로 통해 노이즈 발생원으로부터 저 레벨 회로로 직접 유입되어 신호 상에 나타나게 된다.

본 논문의 유도형 변위 센서는 작동 원리상 교류 전류로 자기장을 발생시켜 동작하기 때문에 이 자기장에 의한 방사 노이즈가 두드러지게 나타난다. 노이즈 최소화를 위해 센서 신호에 나타나는 노이즈를 분석하고 노이즈 억제를 고려한 센서 회로 설계에 대한 연구를 수행하였다.

2. 센서 작동 원리

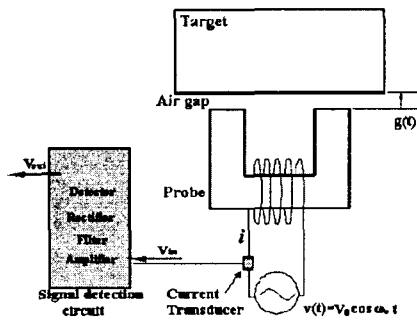


Fig. 1 Schematic of an inductive displacement sensor

유도형 변위 센서는 프로브(probe)에서 발생하는 자기장을 이용하여 타겟의 공극(air gap) 변화를 전기 신호로 검출함으로써 타겟의 변위를 비접촉 방식으로 측정하게 된다. Fig.1은 유도형 변위 센서의 기본 구조를 보여주고 있다. 센서 프로브는 전자석 형태를 하고 있어 코일에 인가된 교류 전원에 의해 교류 자기장 $\phi(t)$ 을 형성하게 된다. 이 자기장은 공극을 지나 자성 재료의 타겟을 통과하는 루프를 형성하게 되고, 이때 공극 $g(t)$ 의 변화는 인덕턴스 $L(t)$ 의 변화를 가져와 코일에 흐르는 교류 전류 $i(t)$ 의 진폭을 변화시킨다.

$$v = n \frac{\partial \Phi}{\partial t} + Ri \quad (1)$$

식(1)은 유도형 센서 코일의 인가전압 v 과 교류자기장에 의한 유도 기전력 그리고 코일 고유저항 R 에 의한 전압강하의 관계

식을 나타내고 있다. 인덕턴스 항으로 나타내면,

$$v = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} + Ri \quad (2)$$

이다. 이때, 교류 전류의 변화율이 상대적으로 크다면,

$$v \approx L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

와 같이 둘째항과 셋째항을 무시할 수 있다. 따라서 코일에 흐르는 전류는

$$i = \frac{1}{L} \int v dt \quad (4)$$

가 된다. 여기서 강자성체의 코어와 타겟의 투자율이 공기에 비해 매우 크고, 공극 부분의 자기장 프링징(fringing)과 누설 자속을 무시한다고 가정하면, 코일의 자기 인덕턴스(self-inductance)는 $L \propto \frac{1}{g}$ 의 관계로 근사화 할 수 있다. 만약,

인가전압 v 가 정현파 $V \cos(\omega t)$ 라 하면 식(4)에 의해

$$i \propto \frac{gV}{\omega} \sin(\omega t) \quad (5)$$

관계가 성립된다. 즉 공극과 전류 진폭은 비례관계가 된다.

공극 변화에 따라 진폭이 변하는 교류의 전류 신호는 전류 센서를 통해 전압신호 v_{in} 로 바뀐다. 만약 타겟의 진동에 의해 공극이 정현파 형태로 변한다면 v_{in} 는 Fig.2의 (a)파형 형태로 나타날 것이다. 이 파형은 진폭 변조(amplitude modulation) 신호 형태로서 신호 검출 회로에 의한 복조과정(demodulation)을 통해 (b)파형을 거쳐 (c)파형으로 된다. 그리고 이 (c)파형은 센서의 출력 신호인 변위 신호 v_{out} 가 된다. 이때 복조 기능 특성에 따라 변위 신호에는 리플(ripple) 신호가 남아 있게 된다. ⁽¹⁾

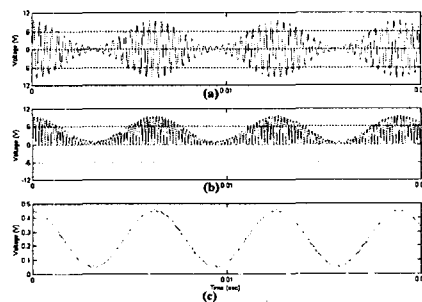


Fig. 2 Demodulation process of an inductive displacement sensor

3. 전기 노이즈

3.1 센서 출력 신호 상의 노이즈

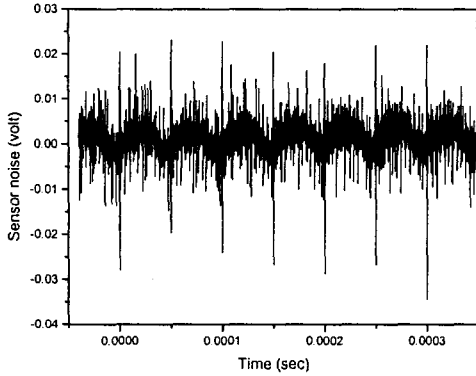


Fig. 3 Noise waveform of inductive displacement sensor output signal

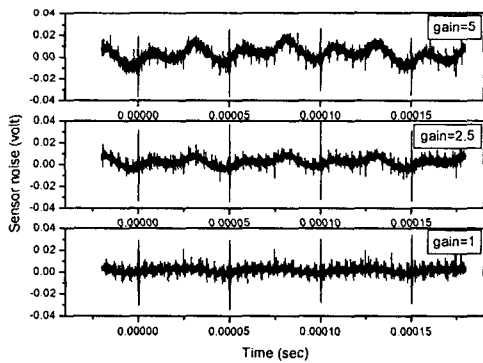


Fig. 4 Noise characteristic of inductive displacement sensor output signals according to amplifier gains

Fig.3은 기존에 설계되었던 유도형 센서 출력 신호에 나타나는 전기적 노이즈 형태를 보여주고 있다. 복조 기능에 의한 리플 파형과 그 사이마다 피크 신호 형태의 노이즈가 두드러지게 나타남을 볼 수 있다.

Fig.4는 이 센서의 신호 검출 회로에서 신호 증폭기의 증폭비에 따른 노이즈 변화를 나타내는 실험결과이다. 증폭비가 커질 때, 리플 파형은 증폭되나 피크 형태 노이즈는 큰 변화가 없음을 볼 수 있다. 리플 파형은 신호 검출 회로의 복조기 역할

을 하는 저역통과 필터의 감쇠비에 의해 크기가 결정되므로 신호 증폭기에 의해 증폭된 변조 신호와 같은 비율로 증폭되나, 피크 형태 노이즈는 신호 증폭기(차동 증폭기)와 상관없이 회로 전역에 나타나는 노이즈임을 고찰할 수 있다.

3.2 자기장 커플에 의한 노이즈

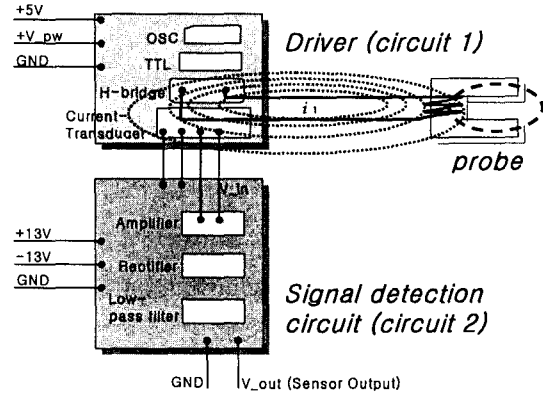


Fig. 5 Magnetic coupling noise source of an inductive displacement sensor

공간상의 시변 자기장은 그것과 쇄교하는 도체상에 유도 기전력을 일으킨다. Fig.5는 유도형 센서에서 발생하는 자기장 커플에 의한 노이즈 기원을 간략하게 나타내고 있다. 이 노이즈는 자기장을 발생시키는 구동 전류의 주파수와 같은 주파수를 갖는다. 자기장 커플에 의한 노이즈의 모델식은

$$v_n = -M_{21} \frac{di_1}{dt} \quad (6)$$

이다. 여기서 v_n 은 자기장 커플에 의해 유도된 기전력이고, M_{21} 은 자기장 발생 회로(회로1)과 신호 회로(회로2)사이의 상호 인덕턴스(mutual inductance)이고, i_1 은 자기장 구동 전류이다. i_1 의 주파수를 f 라 하면, 식(6)은 주파수 영역에서

$$|V_n(f)| = |j2\pi f M_{21} I_1(f)| \quad (7)$$

으로 나타낼 수 있다. 자기장 커플에 의한 노이즈의 크기는 자기장 구동 전류의 주파수와 진폭 그리고 상호 인덕턴스에 비례한다. Fig.6은 유도형 센서의 구동 전류의 주파수에 따른 출력 신호의 노이즈 특성을 나타내고 있다. 주파수가 커질수록 자기장 커플링 노이즈가 증가됨을 볼 수 있다. Fig.7은 구동 전류 진폭에 따른 센서 출력 신호의 노이즈 특성을 나타내고 있다. 진폭이 커질 수록 노이즈도 커짐을 볼 수 있다.

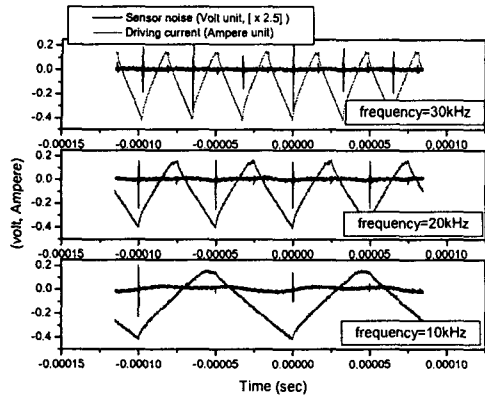


Fig. 6 Noise characteristic of inductive displacement sensor output signals according to frequency of driving current

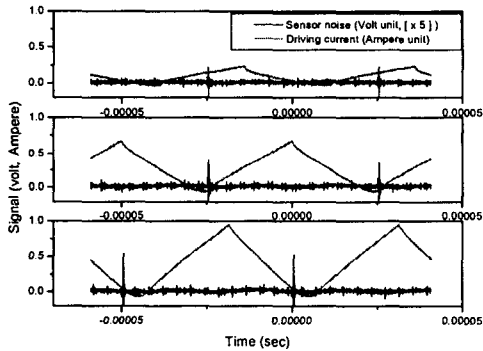


Fig. 7 Noise waveform of inductive displacement sensor output signals according to magnitude of driving current

유도형 센서에서 자기장 커플에 의한 노이즈 발생원으로부터 센서 신호에 미치는 노이즈 경로를 고찰하기 위해 노이즈 발생원이 되는 구동회로와 노이즈 수신 회로인 신호처리회로 사이의 데이터 선을 연결하지 않을 때와 연결했을 때의 출력 신호에서의 노이즈 특성을 실험적으로 확인해 보았다. 두 실험 결과 전체 노이즈 중에 약 23%가 데이터 선을 따라 전도되고 나머지는 직접 방사에 의해 노이즈가 발생됨을 고찰할 수 있다.

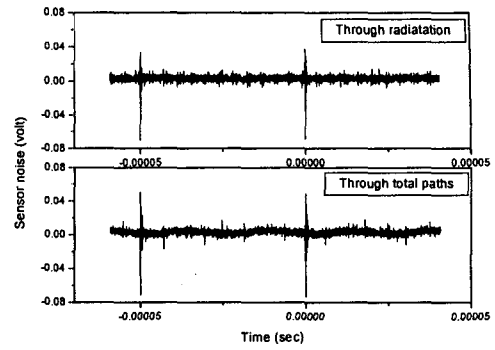


Fig. 8 Noise characteristic of inductive displacement sensor output signals according to noise path

4. 노이즈 억제와 센서 성능

노이즈는 센서가 측정하고자 하는 변위와는 무관한 신호이다. 그래서 노이즈 크기 보다 작은 센서의 변위 신호로부터 변위의 정보를 얻기는 어렵다. 따라서 센서 출력 신호에 나타나는 노이즈 크기에 따라 센서의 분해능이 결정된다. 일반적으로 아날로그 센서의 분해능은 다음과 같이 정한다.

$$Resolution = \frac{V_n}{sensitivity} \quad (8)$$

여기서 V_n 은 센서 출력 신호에 연속적으로 나타나는 노이즈의 최대 진폭을 의미한다. 따라서 센서의 분해능을 높이기 위해서는 감도를 높이고 노이즈 크기를 줄여야 한다. 유도형 센서의 경우 자기장 커플에 의한 노이즈가 구동 전류의 진폭과 주파수에 비례하므로 그 값들을 낮춤으로써 노이즈를 억제할 수 있다. 하지만 구동 전류의 진폭을 낮추기 위해 인가 전압 V 를 낮출 경우 식(6)에 의해 센서의 감도도 떨어지게 되어 센서의 분해능에는 도움이 되지 못한다. 구동 전류의 주파수를 낮출 경우 식(6)에 의해 감도는 좋아질 수 있으나 식(3)의 가정에 맞지 않을 수 있고, 신호 처리 상 복조 기능이 떨어져 오히려 센서 신호에 리플 파형이 크게 존재할 수 있다. ⁽¹⁾

따라서 본 논문은 센서 분해능 향상을 고려하여 구동 전류 특성은 조정하지 않고 단지 노이즈 발생 회로인 구동 회로와 노이즈 수신 회로인 신호 처리 회로 사이의 상호 인덕턴스를 이용하여 노이즈 억제 대책을 고찰하였다.

4. 노이즈 방지 대책 및 회로 설계

4.1 노이즈 발생원

유도형 변위 센서의 노이즈 발생원은 센서 구동 회로가 된다. 구동 회로의 H-bridge는 교류의 삼각파 전류를 발생하고 이 교류의 전류가 프로브 코일과 전선을 통해 흐르면서 형성하는 전류 루프가 자기장을 외부로 방사시키는 근원이 된다. 따라서 자기장 방사를 최소화하기 위해 구동회로에서 자기장 발생 루프 면적을 최소화하는 회로 구성을 설계하였다.

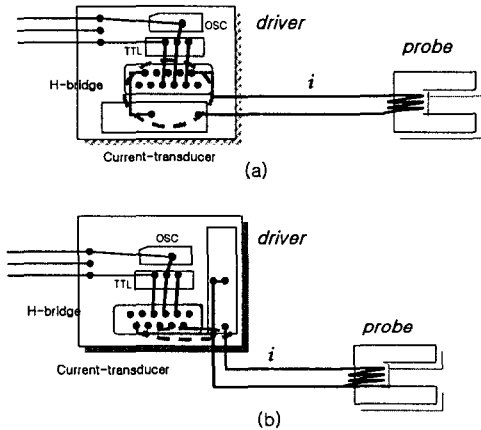


Fig. 9 Old and New designs of the driver circuit of an inductive displacement sensor

Fig.9는 기존 센서 구동 회로(a)와 노이즈를 고려한 새로운 구동 회로(b)의 개략도이다. 부품을 재배치하여 회로 내에서

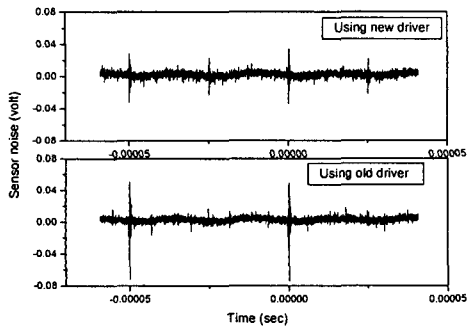


Fig. 10 Noise characteristic of inductive displacement sensor output signals according to old design and new design of the driver

형성되는 전류 루프를 최소화하였다. Fig.10은 Fig.9의 두 회로에 대한 센서 출력 신호에서의 노이즈 변화를 나타내고 있다. 기존 설계된 구동회로에 비해 새로운 구동회로에 의한 센서 출력 노이즈의 크기가 절반으로 줄어들음을 볼 수 있다.

4.2 노이즈 수신 회로

센서의 신호 검출 회로는 저 레벨 회로로서 노이즈에 민감하게 영향을 받게 된다. 따라서 최종적으로 센서 출력 신호를 만드는 신호 검출 회로의 자기장 커플 노이즈에 대한 내성을 키우기 위한 설계 방법을 고찰하였다. 공기중으로 방사되는 자기장에 민감한 회로의 원인으로서 회로 상의 배선으로 형성된 루프를 들 수 있다. 특히 회로 곳곳에 뻗어 있는 그라운드 선이 폐곡선에 가까운 루프가 형성될 때 방사된 자기장이 쉽게 검출되어 영향을 미치게 된다. 따라서 신호 검출 회로는 배선이 루프를 형성하지 않도록 회로를 설계해야 한다. Fig.11은 신호 검출 회로의 배선 상의 루프를 최소화한 설계(위)와 그렇지 않은 기존의 회로 설계(아래)의 센서 노이즈 크기를 비교하고 있다. 최소화 한 경우 자기장에 의한 노이즈 진폭이 약 25 mV 정도 줄어든 것을 볼 수 있다.

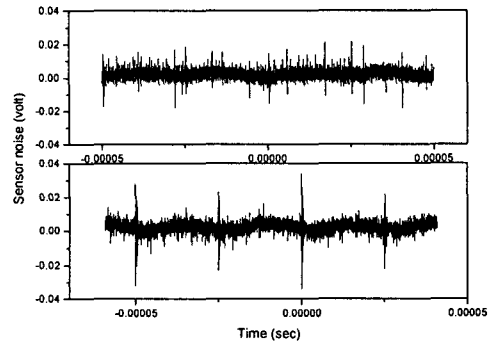


Fig. 11 Noise characteristic of inductive displacement sensor output signals according to old design and new design of the signal detection circuit

5. 결론

본 논문은 유도형 변위 센서 설계 시 고려해야 할 노이즈에 대한 해석과 그 방지 대책에 대해 나타내었다. 유도형 센서가 고주파의 삼각파 전류를 구동 전류로 사용하기 때문에 자기장

커플에 의한 노이즈가 매우 심하게 나타남을 확인할 수 있었다. 이 노이즈는 근본적으로 구동 전류의 주파수와 진폭 크기가 커짐에 따라 커지게 된다. 하지만 노이즈 억제를 위해 구동 전류의 진폭과 주파수를 낮추게 되면 센서 신호의 선형성과 감도가 떨어지게 된다. 따라서 본 논문은 자기장 커플 노이즈의 억제를 위해 구동회로와 신호처리회로 사이의 상호 인덕턴스를 낮추는 방법으로 고찰하였다. 실험 결과 유도형 센서의 노이즈 레벨이 35mV로 낮아짐을 확인할 수 있었다.

또한 본 연구 수행 중, 구동 전류의 파형이 정현파일 때 노이즈가 매우 떨어질 수 있을 가능성을 확인할 수 있었다. 삼각파는 특히 그 모서리 부분에서 전류 변화율이 매우 크게 되므로 그 부분에서 피크 형태의 노이즈가 크게 발생하게 된다. 하지만 정현파는 전체가 부드러운 곡선을 이루기 때문에 이 피크 형태의 노이즈가 거의 존재하지 않을 것으로 예상된다. 향후 연구 계획으로서 정현파 형태의 전류를 발생하는 센서 구동 회로에 대한 연구를 수행하여 자기장이 커플에 의한 노이즈 억제에 대한 보다 효과적인 방법을 모색해 보고자 한다.

참 고 문 헌

(1) Woo-cheol Shin, Jun-hee Hong, Dong-ju Lee, 2002, "A Theoretical Investigation for Improving Dynamic Characteristics of Inductive Position Sensor", Proceedings of the KSMTE Spring Conference 2003, pp. 472~477.

(2) Dr. C. S. Choy, Dr. C. F. Chan, Mr. M. H. Ku, 1995, "A feedback control circuit design technique to suppress power noise in high speed output driver", IEEE, 0-7803-2570-2/95, pp. 307~310.

(3) Jiayuan Fang, Yaowu Liu, Yuzhe Chen, Zhonghua Wu and Amit Agrawal, 1993, "Modeling of Power/Ground Plane Noise in High Speed Digital Electronics Packaging", IEEE, 0-7803-1427-1/93, pp.206~208.

(4) Peter J. Fish, 1993, Electronic Noise and Low Noise Design, MACMILLAN, London, pp. 31~45.