

디지털 방식의 정밀 변위 센서 개발에 관한 연구

A Study of Precision Digital Displacement Sensor Development

송원길† · 정규철* · 이현준*

Won-Gil Song, Kyu-Chul Jung and Hyun-Jun Lee

1. 서 론

LCD 및 반도체 생산 장비는 초정밀 구동 장치가 수십 나노 미터 수준의 매우 작은 오차 범위 내에서 고속 구동을 한다. 따라서 외부에서 들어오는 미세 진동을 차단하기 위해 능동 및 반능동형의 방진 장치를 사용하게 된다. 따라서 방진 장치는 제진대의 거동을 마이크로급(μm)으로 정밀하게 측정할 필요가 있는데, 방진 성능을 위하여 비접촉식의 변위센서를 사용하는 것이 일반적이다.

정밀한 변위를 측정하기 위한 비접촉 변위센서로는 레이저 변위센서와 와전류 변위센서가 있다. 레이저 변위센서는 안정적인 변위정보를 얻을 수 있으나, 가격이 매우 높아 경제성이 떨어진다. 와전류 변위센서는 사용부품의 물성과 아날로그 회로를 통해 출력을 선형화 할 수 있고, 레이저 변위센서에 비해 가격이 저렴한 편이다. 하지만, 대부분의 와전류 변위센서는 아날로그 출력방식이므로 옵셋과 드리프트가 발생하고, 이를 디지털로 변환하는 과정에서 잡음이 혼입될 수 있다.

이러한 아날로그 방식의 와전류 변위센서의 단점을 보완하기 위해 ADC 가 필요 없는 디지털 방식의 경제성이 높은 와전류 변위센서를 개발하였다.

2. 와전류 변위센서

2.1 와전류 변위센서의 설계

(1) 와전류 생성

고주파 자계에 금속을 접근시키면, 전자기 유도에 의해 금속에 소용돌이 형태의 와전류(Eddy Current)

가 발생된다. 와전류는 금속표면에 집중되며, 금속의 깊이에 따라 지수함수로 감소한다.

와전류는 고주파 자계의 세기와 주파수, 금속의 전도도, 투과율 등에 따라 변화된다. 센서코일이 금속판에 가까워지면 와전류가 발생하고, 발생한 와전류에 의해 자계와 센서코일의 고주파 자계는 서로 상쇄하는 방향으로 작용하므로, 고주파 임피던스가 변하게 된다.

(2) 감지코일의 임피던스 변화

감지코일과 금속물체 사이의 전자기적 관계는 변압기로 생각할 수 있다. 1차 감지코일은 권선저항과 자기인덕턴스로 나타낼 수 있고, 금속물체 또한 적절한 저항과 자기인덕턴스로 표현할 수 있다. 이들은 전자기적으로 결합되므로, 상호인덕턴스가 작용한다. 이러한 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & -j\omega M \\ -j\omega M & R_2 + j\omega L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & -j\omega M \\ -j\omega M & R_2 + j\omega L_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

이므로, I_1 을 구하면 다음과 같다.

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + j\omega(L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2})} \quad (2)$$

1차측에서 바라본 등가 임피던스를 Z 라고 하면

$$Z = R + j\omega L, \quad Z = \frac{U}{I_1} \quad (3)$$

$$R = R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}, \quad L = L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다

† 교신저자; 알엠에스 테크놀로지(주)

E-mail : rmstech@rmstech.co.kr

Tel : 041)556-7600 , Fax : 041)556-7603

* 알엠에스 테크놀로지(주)

1차 측에서 바라본 등가 임피던스는 주파수 w , 비저항 ρ , 투자율 μ , 변위 x 의 함수이며, 내부온도 T 의 영향을 포함한 함수 f 로 나타낼 수 있다. 이 중에서 주파수 w , 비저항 ρ , 투자율 μ 의 변동폭이 매우 작다면 식 (5)와 같이 적절한 함수관계로 간소화할 수 있다.

$$Z = f(x, \rho, \mu, w, T) \approx g(x, T) \quad (5)$$

내부온도 T 의 변화에 따른 출력신호의 변화에 대한 아날로그 회로적인 보정은 매우 복잡하므로, 온도를 측정하여 디지털방식으로 보정한다.

3. 디지털 와전류 변위센서의 구조와 동작

개발한 센서의 출력펄스는 Fig.1과 같이 FPGA 내부에 구성된 변위 카운터(P-Counter)와 속도 카운터(V-Counter)에 의해 속도신호와 변위신호로 변환되며 DSP의 신호처리과정을 통해 최종적인 변위/속도 값을 얻는다.

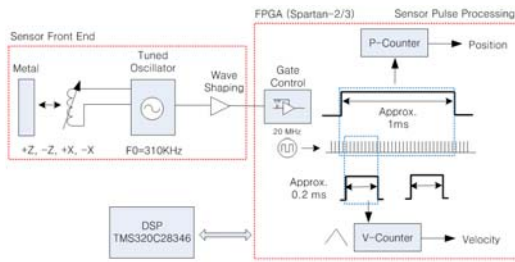


Fig. 1 Structure of digital displacement sensor

주파수편이와 변위카운터의 관계는 식 (6)과 같다.

$$N_0 = \left[\left(\frac{n}{f_1} \right) \right] = \left[\left(\frac{f_0}{\left(\frac{f_1}{n} \right)} \right) \right] = \left[n \frac{f_0}{f_1} \right] \approx n \frac{f_0}{f_1} \quad (6)$$

센서에 물체가 접근하여 주파수가 변할 때 변위카운터의 절대값과 편이값을 식 (7)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} N_1 &= \left[n \frac{f_0}{(f_1 + \Delta f)} \right] \approx n \frac{f_0}{(f_1 + \Delta f)} \\ &= n \frac{f_0}{f_1 \left(1 + \frac{\Delta f}{f_1} \right)} \approx n \frac{f_0}{f_1} \cdot \left(1 - \frac{\Delta f}{f_1} \right) \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta N = N_0 - N_1 \approx n \frac{f_0}{f_1} \cdot \left(\frac{\Delta f}{f_1} \right) = n \frac{f_0}{f_1} \cdot r \quad (7)$$

3. 성능 확인 및 실험

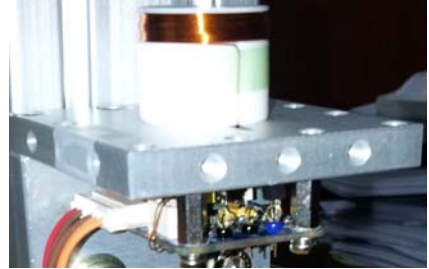


Fig. 2 The shape of developed sensor

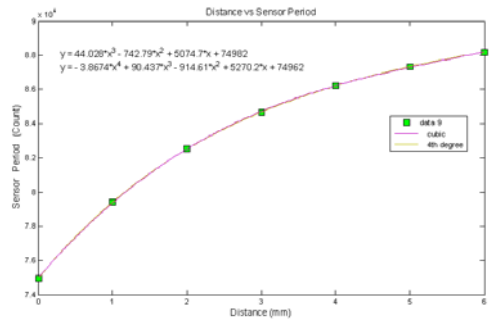


Fig. 3 The result of curve fitting

본 연구를 통해 설계/제작한 와전류 센서의 외형과 센서출력/커브피팅의 결과를 Fig. 2과 Fig. 3에 나타내었다.

센서의 분해능은 거리에 따라 변화되는데, 변위가 2mm일 때 분해능은 약 $0.4\mu\text{m}$ 이다. 개발된 센서로 제어한 체진대의 특성을 참조용 레이저 변위센서로 측정한 결과 센서 정밀도와 제어오차를 포함해서 $0.5\mu\text{m}$ 미만의 정밀도를 확인할 수 있었다.

4. 결 론

방진 장치로부터 체진대의 거동을 측정하기 위해 아날로그 회로에 의한 ADC가 필요 없는 디지털 출력의 경제성이 높은 고정밀 와전류 변위센서를 개발하였다. 개발한 센서는 아날로그 출력 방식의 와전류 변위센서의 단점을 보완하였고, 실험을 통해 성능을 확인하였다.