ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 29(4), 129-133 (2019) https://doi.org/10.4283/JKMS.2019.29.4.129

Displacement Sensor Using Mutual Inductance

Hyung-Guen Kim, Kyung-Won Kim, and Kwang-Ho Shin*
Department of Information & Communication Engineering, Kyungsung University, 110-1 Daeyeon-dong, Nam-gu, Busan 48434, Korea

(Received 11 August 2019, Received in final form 28 August 2019, Accepted 29 August 2019)

In this study, the displacement sensor using the phenomenon that the mutual inductance of two LC resonators is dependent on the proximity distance is investigated. The inductance of the air core inductor was measured in the frequency range of 1~100 kHz and the capacitance was calculated from the measured resonant frequency. When two LC resonant elements fabricated with the air-core inductor and an external capacitor were close to each other, the signal obtained from the primary resonant element depended on the proximity distance of two resonant elements. It was confirmed that the measured frequency characteristics of the output signal were also depended on the proximity distance. The reason why the output signal changes were depending on the proximity distances could be explained by the fact that the mutual inductance between the two resonator elements depends on the proximity distance.

Keywords : displacement sensor, air-core inductor, resonance frequency, mutual inductance

상호 인덕턴스를 이용한 변위센서

김형건 · 김경원 · 신광호*
경성대학교 정보통신공학과, 부산시 남구 대연동 110-1, 48434

(2019년 8월 11일 받음, 2019년 8월 28일 최종수정본 받음, 2019년 8월 29일 게재확정)

2개의 LC공진소자의 상호 인덕턴스가 근접 거리에 의존하는 현상을 이용하는 변위센서에 대해서 조사하였다. 공심 인덕터의 인덕턴스와 함께, 측정된 공진 주파수로부터 자체 캐패시턴스를 계산하였다. 공심 인덕터와 외부 캐패시터를 이용하여 제작한 LC 공진 소자를 근접시킬 때, 근접 거리에 의존하는 출력 신호의 주파수 특성을 측정함으로써 1차측 공진 소자로부터 얻어지는 신호가 2차측 공진 소자와의 근접 거리에 의존하는 것을 확인하였다. 두 공진 소자의 근접 거리에 의존하는 출력 신호의 변화는 두 공진 소자 사이의 상호 인덕턴스가 근접 거리에 의존하기 때문에 나타난다는 것으로 설명할 수 있었다.

주제어 : 변위센서, 공심 인덕터, 공진 주파수, 상호 인덕턴스

I. 서 론

변위센서는 가장 기본적인 기계량 센서의 하나로서, 측정 대상물의 정적인 위치나 물체의 근접 등을 측정하기 위한 센서이다. 지금까지 다양한 종류의 변위센서가 제안되고 있으나 [1-5], 전자유도를 이용하는 변위센서는 비접촉으로 변위를 측정할 수 있을 뿐 만 아니라, 시야가 확보되지 않는 오염된 공간에서도 사용할 수 있기 때문에 다양한 용도로 적용되고 있다. 최근 본 연구 그룹에서는 LC공진을 이용한 변위센서를 제안하였다. 기존에 사용되고 있었던 전자유도식 변위센서의 경우, 다양한 주파수의 자계 노이즈가 존재하는 경우 오동작을 일으킬 수 있는 반면, 본 연구 그룹에서 최근 제안한 LC 공진형 변위센서의 경우, 2개의 LC공진기의 상대적인 거리 변화에 따라 공진 주파수가 변화하는 점에 착안하여 개발된 것으로, 변위에 따르는 주파수 변화를 취득하는 방법을 사용하기 때문에 노이즈에 강인하다는 장점이 있다[6]. 그러나, 본 연구 그룹의 이전 연구에서는 2개의 LC공진기를 각각 송신기와 수신기로 사용하였기 때문에, 각 LC공진기가 전기적으로 장치에 접속되어야 한다는 단점이 있었다.

본 연구에서는 2개의 LC공진기가 인접하고 있을 때, 1차측 LC공진기의 임피던스가 2차측 공진기와의 상대적 거리에 따라 변화한다는 점에 주목하여, 2차측 LC공진기를 전기적으로 장치에 접속하지 않고도 변위센서로 사용 가능 한지 조사하였다. 새로운 타입의 센서가 산업현장에서 응용되기 위해서는 구체적인 응용에 대한 다양한 검토와 최적화가 필요하다.

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-51-663-5152,
Fax: +82-51-625-1402, e-mail: khshin@ks.ac.kr

본 연구는 상호인덕턴스를 이용하여서 변위센서를 구현할 수 있는지를 조사한 기초적인 연구이다.

II. 실험 방법

Fig. 1(a)는 본 연구에서 사용한 공심 코일의 사진을 나타낸 것이다.

실험에 사용한 공심 코일은 직경 140 μm의 에나멜 절연 구리선을 87턴 감아서 제작한 것으로 코일의 두께는 1 mm, 내경은 5 mm, 외경은 9.25 mm였다. Fig. 1(b)는 측정을 위한 등가회로를 나타낸 것이다. 두 코일의 인덕턴스는 각각 *L_coil1*과 *L_coil2*로 나타내었고, 코일의 저항은 각각 *R_coil1*과 *R_coil2*로, 코일의 캐패시턴스는 각각 *C_coil1*과 *C_coil2*로 나타내었다. 등가 회로 상에서의 전원 *Vin*은 주파수와 전압의 크기를 조정할 수 있는 신호발생기를 사용하였고, *Vout*에서 발생하는 전압은 디지털 오실로스코프로 측정하였다. 두 코일 사이의 상대적인 변위를 변화시키기 위해서 Fig. 1(c)와 같이, 두 코일이 마주 보도록 설치하고 *Coil1*을 고정시킨 후, 10 μm 단위로 움직일 수 있는 마이크로미터를 이용하여서 *Coil2*를 상하로 움직이도록 하였다. 코일의 직류 저항(*R_coil1*과 *R_coil2*)은 2.3 Ω이었고, 1~100 kHz의 주파수 영역에서 측정한 인덕턴스(*L_coil1*과 *L_coil2*)는 58.5 μH로 주파수에 무관하게 동일하였다. 코일의 캐패시턴스 *C_coil1*과 *C_coil2*은 직접적으로 측정할 수 없다. 본 연구에서는 코일의 자체 공진주파수를 측정한 후, 공진주파수가 인덕턴스와 캐패시턴스에 의해서 결정 된다는 점을 고려하여 캐패시턴스를 계산하였다. 측정된 코일의 자체 공진주파수는 3.2 MHz였다. 공진 주파수와 인덕턴스가 주어졌을 때 캐패시턴스는 $C_coil = 1/L\omega^2$을 이용하여서 계산할 수 있으며, 계산된 캐패시턴스(*C_coil1*과 *C_coil2*)는 42.3 pF이었다.

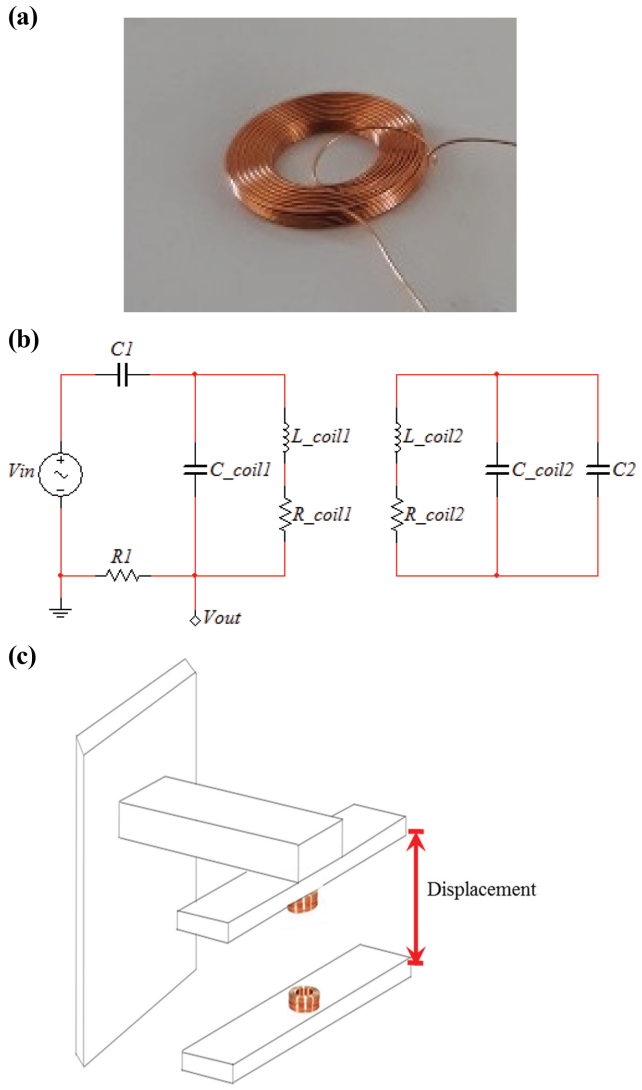

Fig. 1. (Color online) Photograph of air-core coil (a), equivalent circuit (b) and schematic view (c) of the experimental setup.

III. 실험 결과

Fig. 2는 두 개의 인접한 코일의 상대적 거리에 따른 첫번째 코일의 인덕턴스를 측정한 결과이다. 두번째 코일의 두 단자는 단락 시킨 상태였다. 마이크로미터기를 이용하여 코일의 상대적 거리를 100 μm씩 변화시키면서, LCR 미터기를 이용하여 코일의 인덕턴스를 측정하였다. 이 때, 측정주파수는 100 kHz, 인가 전류는 20 mA로 인가하였다.

Fig. 2에서 나타낸 결과에서 측정된 인덕턴스는 두 코일 사이의 상호 인덕턴스가 더해진 값으로, 변위에 따라 발생하는

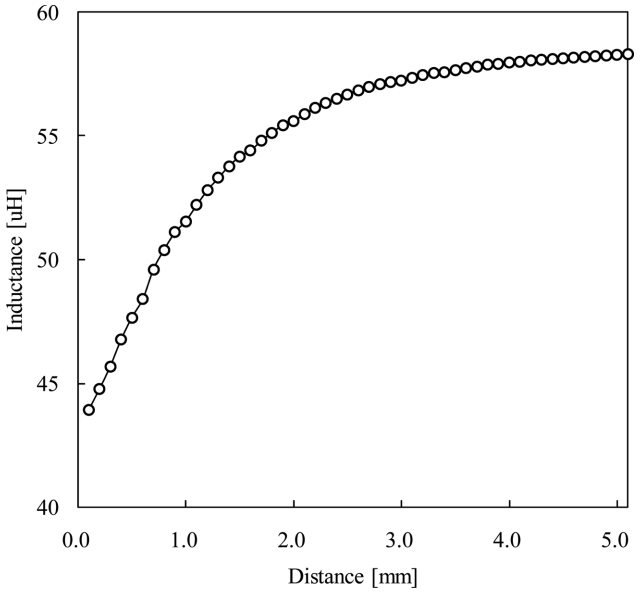

Fig. 2. Distance dependence of the inductance of primary coil.

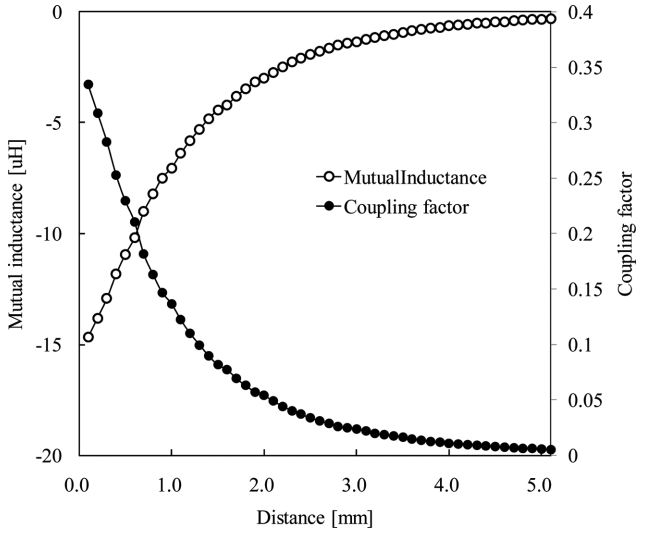

Fig. 3. Distance dependence of the mutual inductance and coupling factor.

상호 인덕턴스의 변화가 포함되었다는 것을 알 수 있다. 그림에서 인덕턴스가 변위에 따라 증가하다가 약 2.1 mm에서부터는 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 이는 두 개의 코일 간의 상호 쇄교하는 자속이 0이 되어 자체인덕턴스 값만 측정 된 것을 의미한다. 여기서 두 코일 사이의 전기적 결합계수를 k, 상호인덕턴스를 M이라고 하면,

$$M = k\sqrt{L_coil1 \cdot L_coil2} \tag{1}$$

의 관계가 있다.

Fig. 3은 두 코일 사이의 거리에 따르는 상호인덕턴스와 결합계수를 나타낸 것이다.

상호 인덕턴스는 음의 값을 가지며, 그 크기는 거리에 따라 작아지고 있다. 상호인덕턴스가 작아지는 것은 코일의 거리에 대한 결합 계수가 작아지기 때문이며, 첫번째 코일에서 발생하는 자속이 두번째 코일에 쇄교하는 양이 거리에 따라 적어지기 때문이다. 이 결과로부터 상호 인덕턴스의 변화를 이용할 수 있는 회로를 구성하면 변위에 따라 출력 신호가 변화하는 변위센서를 구성할 수 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 1에서 나타낸 등가 회로를 해석하면 출력 전압을 예측할 수 있다. Fig. 1의 등가회로에서 각 루프의 전류를 i_1, i_2, i_3로 정의하고 키르히호프 전압 법칙을 적용하면 아래의 방정식을 얻을 수 있다.

$$V_{in} + \frac{1}{j\omega C_1} i_1 + \frac{1}{j\omega C_{coil1}}(i_1 - i_2) + R_1 i_1 = 0 \tag{2}$$

$$\frac{1}{j\omega C_{coil1}}(i_2 - i_1) + j\omega L_{coil1} i_1 + R_{coil1} i_2 - j\omega M i_3 = 0 \tag{3}$$

$$\frac{1}{j\omega(C_{coil2} + C_2)} i_3 + j\omega L_{coil2} i_3 + R_{coil2} i_3 - j\omega M i_2 = 0 \tag{4}$$

식(2)~(4)을 연립하여서 풀면 R_l에 흐르는 전류, 즉 i_1을 구할 수 있다.

$$i_1 = \frac{\begin{vmatrix} V_{in} & -\frac{1}{j\omega C_{coil1}} & 0 \\ 0 & Z_2 & -j\omega M \\ 0 & -j\omega M & Z_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Z_1 & -\frac{1}{j\omega C_{coil1}} & 0 \\ -\frac{1}{j\omega C_{coil1}} & Z_2 & -j\omega M \\ 0 & -j\omega M & Z_3 \end{vmatrix}} \tag{5}$$

여기서,

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_{coil1}} + R_1 \tag{6}$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_{coil1}} + j\omega L_{coil1} + R_{coil1} \tag{7}$$

$$Z_3 = \frac{1}{j\omega(C_2 + C_{coil1})} + j\omega L_{coil2} + R_{coil2} \tag{8}$$

이다. 출력전압은 저항 R_l에 걸리는 전압이므로, $V_{out} = R_1 i_1$으로 구할 수 있다.

Fig. 4(a)은, Fig. 1에서 나타낸 등가회로의 출력 단에서, 주파수에 따르는 출력신호를 계산 한 결과로서, 결합계수(k = 0.1~0.3)를 다르게 하면서 계산한 것이다. Fig. 4(a)의 결과에서 알 수 있듯이, 주파수가 증가함에 따라 출력 전압은 증가하다가 최고점 이후에는 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 코일의 인덕턴스와 캐패시턴스(코일 캐패시턴스와 외부 캐패시턴스의 합)에 의한 LC공진 현상에 의한 것이다. Fig. 4(b)는 주파수에 따르는 출력 신호를 직접 측정한 결과이다. 공진 주파수는 측정 거리가 변화함에 따라 2.75~3 MHz로 변화하였다. 변위에 따라 공진 주파수가 변화하는 것은 두 코일 간의 거리가 변화함에 따라 결합 계수가 변화하기 때문이다.

본 실험 결과로부터 1차측 코일에서 출력되는 신호의 공진 주파수를 측정하거나, 적당한 주파수를 선택한 후, 출력 신호의 크기를 비교하여도 변위를 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 회로의 구동주파수를 2.5 MHz로 고정한 후 두 코일 사이의 거리에 따르는 출력신호를 측정한 결과이다.

두 코일 사이의 거리가 대략 2 mm까지는 변위에 대하여

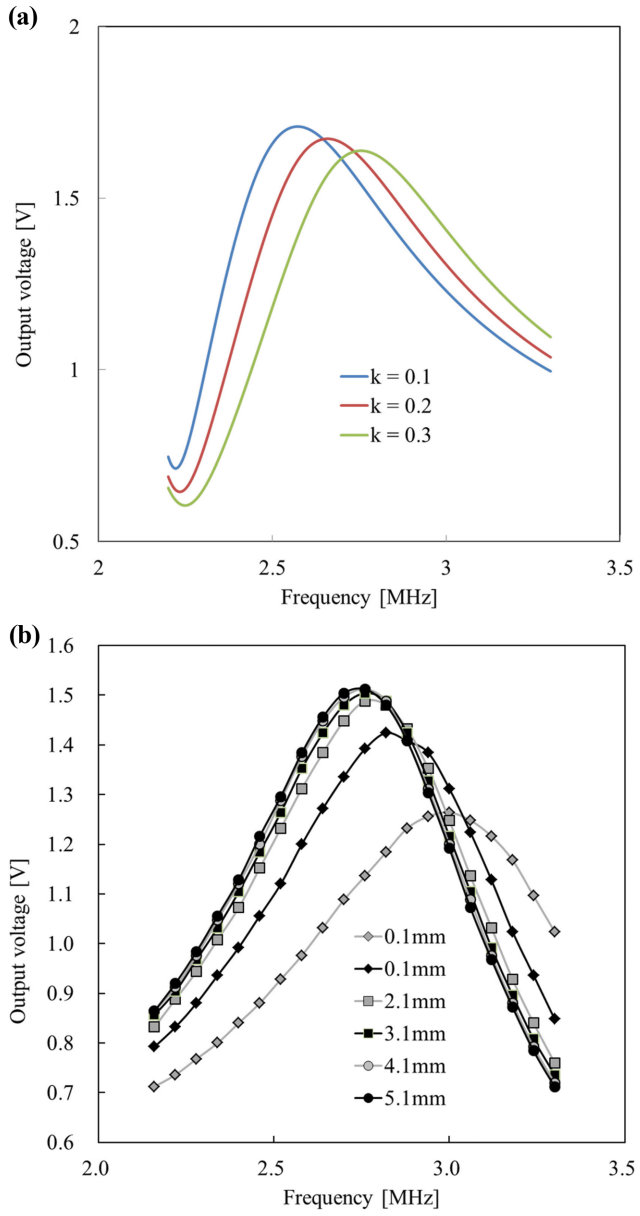

Fig. 4. (Color online) Frequency dependence of output voltage calculated (a) and measured (b).

출력 신호가 선형적으로 비례하는 것을 알 수 있다. 선형성이 비교적 좋은 영역, 즉 0.1~2 mm 사이의 영역에서 감도를 평가할 수 있다. 출력 신호를 얻기 위해서 인가전압을 2 V 인가하였으며, 출력 신호는 0.88~1.15 V 사이에서 변화하였다. 따라서, 산출된 감도는 136 mV/(mm·V)이다. 본 연구에서 검토하고 있는 변위센서는 2차측 코일에 전원을 공급하거나 2차측 코일로부터 신호를 측정할 필요가 없다. 2차측 코일의 근접에 따라서 1차측 코일의 상호 인덕턴스 혹은 결합 계수가 변화하는 것이 출력신호의 변화에 영향을 미치는 방식으로 변위 혹은 근접 유무가 측정된다. 이러한 타입의 변위센

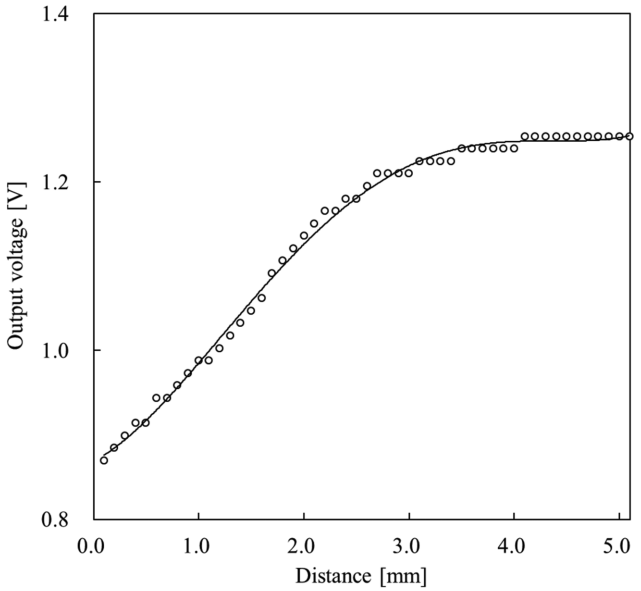

Fig. 5. Distance dependence of output voltage measured at 2.5 MHz.

서는 주파수를 선택하여 측정할 수 있으므로, 자동차 내부나 전동기가 구동되고 있는 환경과 같이 자계 노이즈가 심한 장소에서도 오동작 없이 작동할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서 개발하고 있는 변위센서가 노이즈에 강인하다는 것을 증명하기 위한 추가 실험을 진행할 필요가 있으며, 정량적인 결과를 정리하여 향후 보고할 예정이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 변위가 발생하였을 때 두 코일 사이의 상호 인덕턴스가 변화하는 것을 이용하는 새로운 타입의 변위센서를 개발하는 것을 목적으로 수행되었다. 두 코일 사이의 거리에 따라 인덕턴스가 변화하는 것을 실험적으로 확인하였고, 측정된 인덕턴스 값으로부터 상호 인덕턴스와 결합 계수를 계산하였다. 두 코일과 저항, 그리고 캐패시터로 구성되는 회로를 구성하고, 두 코일 사이의 거리를 변화시키면서 출력 신호의 변화를 측정하였다. 선형적으로 변위가 측정되는 영역은 대략 0.1~2 mm였고, 이 때 산출된 감도는 136 mV/(mm·V)였다.

References

[1] P. B. Kosel, G. S. Munro, and R. Vaughan, IEEE Trans. Instrum. Meas. **IM-30**, 114 (1981).
[2] M. R. Nabavi and S. N. Nihtianov, IEEE SENSORS JOURNAL **12**, 3346 (2012).
[3] N. Lagakos, T. Litovitz, P. Macedo, R. Mohr, and R. Meister, Appl. Optics **20**, 167 (1981).

[4] J. S. Martin, D. J. Fenneman, F. T. Codron, P. H. Rogers, W. R. Scott, Jr., G. D. Larson, and G. S. McCall, Proc. SPIE 4742, Detection and Remediation Technologies for Mines and Mine like Targets VII, 606 (2002).
[5] M. M. Miller, P. Lubitz, G. A. Prinz, J. J. Krebs, and A. S. Edelstein, IEEE Trans. Magn. **33**, 3388 (1997).
[6] K. H. Shin, J. Korean Magn. Soc. **25**, 27 (2015).