

Displacement Sensor Fabricated with LC Resonators

Kwang-Ho Shin*

Department of Information & Communication Engineering, Kyung Sung University, Busan 608-736, Korea

(Received 6 February 2015, Received in final form 16 February 2015, Accepted 16 February 2015)

In this study, the LC resonators were fabricated with ferrite cores and external capacitors, and then their characteristics were investigated for the purpose of developing new displacement sensor. The frequency dependence of impedance of single resonator was estimated. There were two resonance peaks on the impedance spectrum; one by self inductance and the other by mutual inductance. The resonance frequency was shifted linearly in direct proportion to displacement of the resonator showing the proposed device, a pair of LC resonators, could be used a precision displacement sensor.

Keywords : displacement sensor, ferrite core, resonance frequency

LC공진소자를 이용한 변위센서

신광호*

경성대학교 정보통신공학과, 부산시 남구 대연동 110-1, 608-736

(2015년 2월 6일 받음, 2015년 2월 16일 최종수정본 받음, 2015년 2월 16일 게재확정)

본 연구에서는 새로운 타입의 변위센서를 개발하기 위한 목적으로, 페라이트코어를 이용한 인덕턴스와 외부 캐패시터를 이용하는 LC공진자를 제작하고 특성을 검토하였다. 개별 공진자의 임피던스의 주파수의존성을 분석하였고, 두 개의 공진자가 인접해 있을 때 자체 인덕턴스와 상호 인덕턴스에 부합하는 주파수에서 각각의 공진이 일어나는 것을 알 수 있었다. 공진주파수는 5~17 mm의 변위에 대해서 선형적으로 변화하였으며, 제안된 방법으로 정밀한 변위를 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

주제어 : 변위센서, 페라이트 코어, 공진주파수

I. 서 론

변위를 측정하는 센서는 측정 대상물의 정적인 위치나 동적인 이동을 측정하는 소자이다. 변위센서는 정전용량식, 와전류식, 광학식, 전자유도식, 자기센서식, 초음파식, 가변저항식 등 다양한 방식으로 제안되어 있고[1-5], 현재 정밀계측 분야의 핵심소자로 활약하고 있다. 다양한 변위센서 중에서 전자유도식 변위센서는 시야가 확보되지 않는 작업공간에서 비접촉으로 변위의 측정이 가능하기 때문에 공장자동화를 포함한 다양한 응용에서 사용되고 있다. 그러나, 다양한 주파수의 노이즈가 존재하는 공간, 예를 들어, 다수의 모터가 작동되고 있으며 전원 노이즈가 심각한 공간에서는 전자유도식 변위센서가 오동작을 일으킬 우려가 있다[6]. 이러한 문제를 해

결하기 위해서 변위에 따르는 전압 값을 출력하는 것이 아니라 주파수의 변화를 출력하는 센서를 사용할 수 있다. 본 연구에서는 두 개의 LC공진소자를 이용한 새로운 타입의 변위센서에 대하여 실험적으로 검토하였다. 두 공진소자의 공진주파수는 상대적 거리(변위)에 의존하기 때문에 상대적 위치(변위)를 계측할 수 있다.

II. 실험방법

Fig. 1은 제작한 변위센서의 사진(a)과 등가회로(b)를 함께 나타낸 것이다. 1 MHz 이하의 주파수에서의 상대투자율이 1500인 Ni-Zn 페라이트($20 \times 4 \times 2$ mm, TDK Co.)에 직경 100 μ m의 절연된 구리 선을 500턴 감아서 인덕턴스를 형성하고 SMD타입의 캐피터를 병렬로 접속하여 LC공진기를 제작하였다.

Fig. 1에서 L 과 R 은 각각 공진소자의 인덕턴스와 저항을

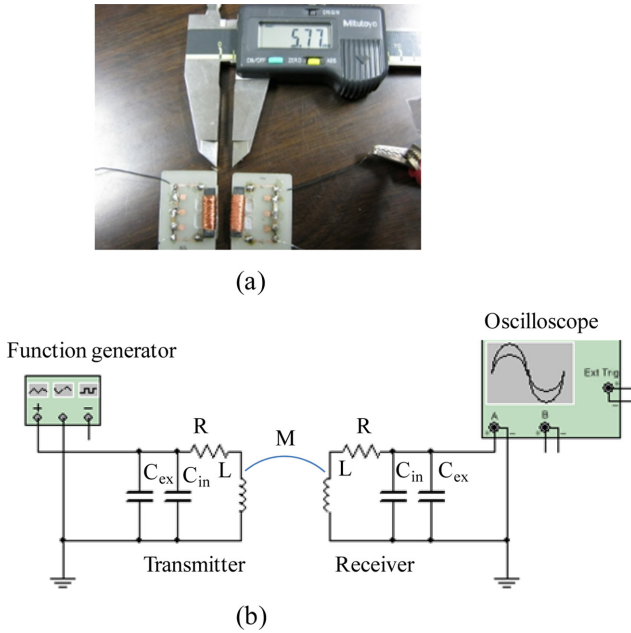


Fig. 1. (Color online) Photograph (a) and equivalent circuit (b) of the fabricated displacement sensor.

나타내고, C_m 과 C_{ex} 는 각각 권선의 선간 캐피시턴스와 외부에서 접속하는 캐피시터의 값을 나타낸다. 두 개의 공진기는 크기 및 형상을 동일하게 하였을 뿐 아니라 인덕턴스와 캐피시턴스도 동일하게 설계/제작하였다. 등가회로 상에서의 캐피시턴스는 코일의 선간 캐피시턴스와 코일 외부에 설치한 캐피시턴스의 합을 나타낸다. 제작한 LC공진기의 전기적 특성은 LCR미터(Hioki3532)를 이용하여서 측정하였고, 두 공진기 사이의 거리(변위)에 따르는 신호전달특성 및 공진주파수는 신호발생기와 디지털 오실로스코프를 이용하여서 측정하였다.

III. 실험결과

페라이트 코어에 감은 권선의 인덕턴스(L_1)는 $1300 \mu\text{H}$ 였으며, 10^4 Oe 의 외부자계를 인가하여 측정된 인덕턴스(L_2)는 $93 \mu\text{H}$ 였다. 솔레노이드 형태의 코일에 있어서 인덕턴스는 $L = \mu_{r, \text{eff}} \mu_0 (N^2 A / l)$ 로 나타낼 수 있다[7]. 외부 자계 10^4 Oe 에 의해서 페라이트 코어가 자기적으로 포화되었다고 가정하면, $\mu_{r, \text{eff}} \approx 1$ 으로 볼 수 있기 때문에 $\mu_{r, \text{eff}} = L_1 / L_2 = 14$ 로 계산할 수 있다. 포화 자계는 자성체의 자기적인 특성뿐 아니라 형상에도 의존하지만 포화 자속밀도에 상응하는 자계보다 큰 자계를 인가하는 경우 형상에 상관없이 자성체는 포화된다. 본 실험에서 사용한 페라이트의 포화 자속밀도가 0.35 T (진공에서 $= 3500 \text{ Oe}$)이었기 때문에 10^4 Oe 의 인가자계에 의해서 포화되었다고 가정할 수 있다. LC공진기의 공진특성을 정확히 알기 위해서는 인덕턴스의 값과 함께 캐피시턴스의 값을 정

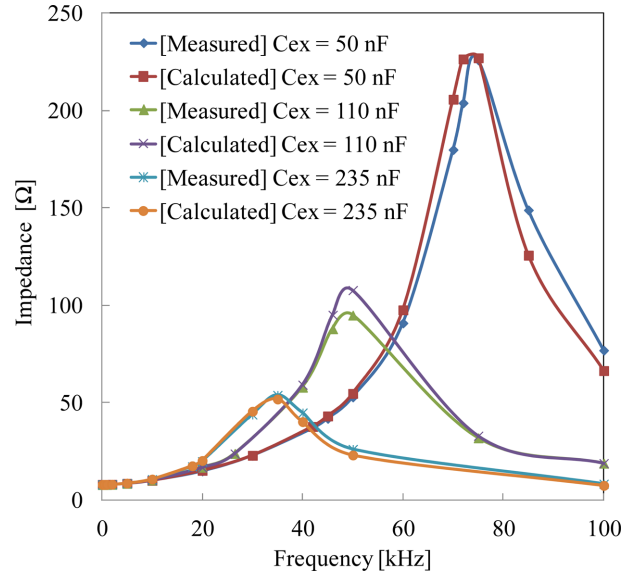


Fig. 2. (Color online) Frequency dependence of impedance of single resonator according to external capacitance.

확히 알아야 한다. Fig. 1의 등가회로에서 LC공진기가 하나만 있을 때의 공진 각주파수는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2} \quad (1)$$

여기서, R ($\approx 8 \Omega$)은 권선의 저항, C 는 선간 용량(C_m)과 외부에 접속한 캐피시턴스의 용량(C_{ex})을 합한 것($C = C_{ex} + C_m$)이다. L 과 R 은 측정이 가능하고 외부 캐피시턴스의 값을 알고 있기 때문에 공진주파수를 측정함으로써 식(1)을 이용하여서 선간 용량을 계산할 수 있다. 이러한 방법으로 산출된 선간 용량은 0.35 nF 이었다. Fig. 2는 외부 캐피시턴스(C_{ex})의 크기를 변화시켰을 때, 임피던스의 주파수특성을 나타낸 것으로 측정결과와 계산결과를 함께 나타낸 것이다. 실험방법에서 이미 설명한 것과 같이, 본 실험에서 사용한 두 개의 LC공진소자는 형상과 크기가 같을 뿐 아니라 인덕턴스 값과 캐피시턴스 값도 동일하도록 설계/제작되었다. 따라서, Fig. 2의 결과는 Fig. 1에서 나타낸 송신기와 수신기 모두의 특성이라고 볼 수 있다. Fig. 2에서 나타낸 임피던스의 계산식은 Fig. 1에서 나타낸 공진소자 등가회로(RLC병렬회로)에 대한 임피던스계산식으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = \frac{(R + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{R + \left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C}\right)} \quad (2)$$

측정된 임피던스와 계산된 임피던스가 잘 일치하는 것을 보여주고 있으며, 이는 측정된 인덕턴스의 값과 산출된 선간 용

량 값이 정확하다는 것을 의미한다. Fig. 1에서 외부 캐피턴스를 크게 함에 따라 임피던스의 최대치가 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 공진소자의 품질계수(Q)의 주파수 의존성에 기인하는 것이다. Fig. 1(b)에서 나타난 등가회로와 같은 경우, 품질계수는 식(3)와 같이 구할 수 있다.

$$Q = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (3)$$

실제로 인덕턴스를 측정하였을 때, 인덕턴스의 값은 ~ 100 kHz의 주파수영역에서 변화가 없었다. 따라서, 품질계수는 식(2)에서 나타난 것과 같이 주파수에 의존하여 커지는 것을 알 수 있다. 품질계수가 크면 감쇄가 작기 때문에 당연히 공진 주파수에서의 임피던스가 크게 나타난다. 또, Fig. 2의 결과로부터 본 실험에서 사용하는 공진기의 공진주파수를 외부 캐피턴스를 이용하여 조절할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 두 LC공진기(Fig. 1참조)의 거리를 5 mm로 했을 때 측정된 임피던스를 나타낸 것이다. 이 때, LC공진자의 외부 캐피턴스 값은 20 nF이었다. 그림에서 알 수 있듯이, 두 개의 공진주파수가 존재하며, 첫 번째 공진주파수는 28.5 kHz이었으며 두 번째 공진주파수는 43.3 kHz였다. 이러한 현상은 공진기의 자체 인덕턴스에 의한 공진과 상호인덕턴스에 의한 공진이 중첩되었기 때문으로 추정된다. Fig. 4는 공진소자의 리액턴스를 계산한 결과이다. 자체 인덕턴스는 1.4 mH, 캐피턴스는 10 nF, 상호인덕턴스는 3 mH로 가정하여 계산하였다. Fig. 5는 Fig. 4에서 나타난 두 개의 리액턴스 계산결과를 중첩시킨 결과이다. 진폭에는 차이가 있으나 주파수특성

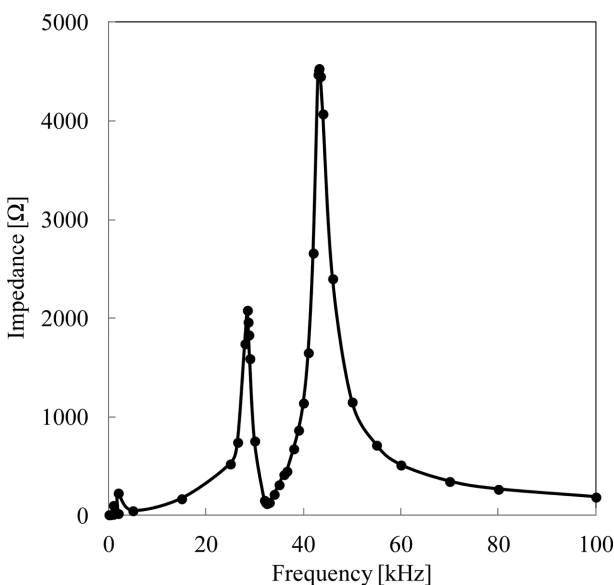


Fig. 3. Frequency dependence of impedance of coupled two LC resonators.

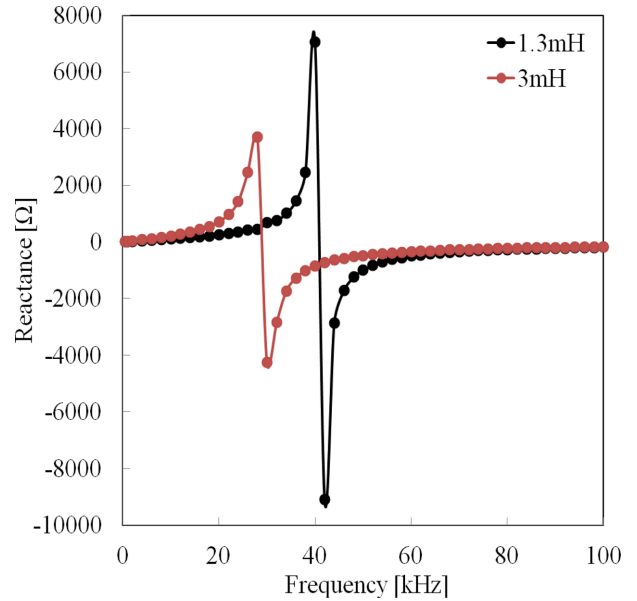


Fig. 4. (Color online) Frequency dependencies of reactance calculated with 1.3 mH and 3 mH.

(공진)의 경향은 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 따라서, 이 결과로부터 Fig. 3에서 나타난 임피던스의 주파수특성에 두 개의 공진 피크가 나타난 것은 자체 임피던스에 의한 공진과 상호임피던스에 의한 공진이 중첩되어 나타난 것으로 이해할 수 있다.

본 연구에서 검토하고 있는 공진소자를 변위센서로 이용하기 위해서는 Fig. 3에서 나타난 것과 같은 두 개의 공진 피크 중 하나의 변화를 읽으면 된다. 두 공진소자의 거리가 멀어지는 경우, 상호인덕턴스는 작아지기 때문에 Fig. 3의 첫 번째 공진주파수는 높아지게 되고, 자체인덕턴스는, 인접한 공진자의 영향을 받지 않아서, 커지기 때문에 두 번째 공진주

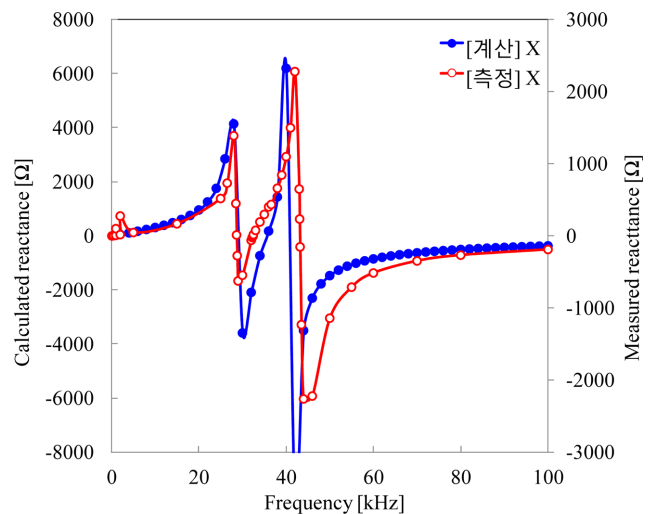


Fig. 5. (Color online) Calculated and measured reactance spectra.

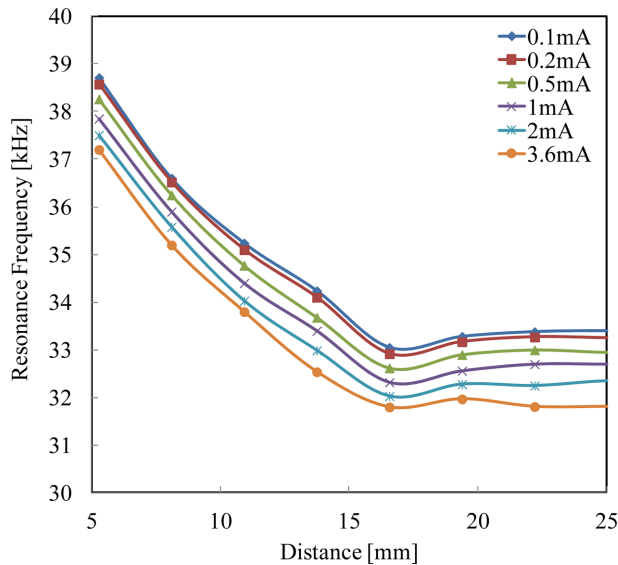


Fig. 6. (Color online) Distance dependence of resonance frequency.

파수는 낮아지게 된다. Fig. 6은 두 공진자의 거리에 따르는 공진주파수(Fig. 3에서의 두 번째 피크)의 변화를 나타낸 것으로, 임피던스측정을 위한 전류를 0.1~3.6 mA로 변화시키면서 측정하였다.

5~17 mm로 두 공진자사이의 거리가 변화함에 따라 공진주파수는 선형적으로 변화함($\Delta f \approx 6$ kHz)을 알 수 있다. 지금까지 실험에서는 정밀한 변위발생장치를 이용할 수 없었기 때문에 변위측정의 분해능은 측정할 수 없었다. 그러나, 임피던스의 공진을 측정하였을 때의 주파수안정성이 1 Hz이내였기 때문에 대략 $2 \mu\text{m}$ 정도의 변위측정 분해능이 얻어질 것으로 예상된다. 추후 정밀위치이동장치를 이용하여서 분해능을 측정할 예정이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 인가 전류를 변화시키더라도 변위에 대한 임피던스 변화율은 차이가 없었다. 측정을 위해서 인가전류를 크게 할 때 공진주파수가 전체적으로 작아지는 것은 페라이트 코어의 실효투자율이 인가전류(자계)의 크기에 의존하기 때문이다. 즉, 실효투자율이 커져서 인덕턴스가 상대적으로 크게 되고, 이는 공진주파수의 저하로 나타나는 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 새로운 타입의 변위센서를 개발하기 위해서, 페라이트코어와 SMD타입의 캐피시터를 이용하여서 LC공진기를 제작하고 그 특성을 분석하였다. 개별 공진기의 주파수 특성을 분석한 결과 외부 캐피시터를 이용하여서 공진주파수를 조정할 수 있음을 알 수 있었다. 두 개의 공진기가 인접해 있을 때 임피던스의 주파수특성에는 두 개의 피크가 나타났고, 각각 자체인덕턴스와 상호인덕턴스의 영향에 의해서 나타나는 것으로 추정되었다. 임피던스특성에서 나타나는 공진주파수는 두 공진자의 거리(변위)가 5~17 mm일 때 선형적으로 변화함을 알 수 있었고, 주파수 안정성(~ 1 Hz)을 고려할 때 대략 $2 \mu\text{m}$ 정도의 변위측정 분해능이 있을 것으로 추정되었다.

감사의 글

이 논문은 2014학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] P. B. Kosel, G. S. Munro, and R. Vaughan, IEEE Trans. Instrum. Meas. **IM-30**, 114 (1981).
- [2] Mohammad Reza Nabavi and Stoyan N. Nihtianov, IEEE Sensors J. **12**, 3346 (2012).
- [3] N. Lagakos, T. Litovitz, P. Macedo, R. Mohr, and R. Meister, Applied Optics **20**, 167 (1981).
- [4] James S. Martin, Douglas J. Fenneman, Fabien T. Codron, Peter H. Rogers, Waymond R. Scott, Jr., Gregg D. Larson, and George S. McCall II, Proc. SPIE 4742, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike 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] M. R. Nabavi and S. N. Nihtianov, IEEE Sensors J. **12**, 3346 (2012).
- [7] D. Howard Dellinger, L. E. Whittmore, and R. S. Ould, National Bureau of Standards (C74, Retrieved 2009-09-07) (1924), pp. 249~249.