

Non-Contact Current Sensor Fabricated with LC Resonators

Kwang-Ho Shin*

Department of Information & Communication Engineering, Kyungsoong University, Busan 48434, Korea

(Received 22 July 2016, Received in final form 9 August 2016, Accepted 12 August 2016)

There is a growing demand for non-contact current measurements for efficient use of electrical power and energy saving. In this study, I propose a non-contact current sensor using LC resonance by a resonance circuit composed of a sensor coil and 2 coupling coils for enabling a wireless measurement. The inductance of the sensor coil, which could be changed by applied current, causes the change of resonance frequency of the resonance circuit. A pair of magnet was attached to the ferrite core to apply a bias magnetic field that enabled the determination of the current direction. We obtained an output voltage change of 18 V with the current of $-3\sim 3$ A. But, the output was nonlinear. In order to realize the non-contact current measuring method proposed in the present study, there is a need for a strict investigation of linearity and resolution for the future study.

Keywords : non-contact current sensor, ferrite core, resonance frequency

LC 공진소자를 이용한 비접촉 전류센서 연구

신광호*

경성대학교 정보통신공학과, 부산시 남구 대연동 110-1, 48434

(2016년 7월 22일 받음, 2016년 8월 9일 최종수정본 받음, 2016년 8월 12일 게재확정)

전력의 효율적인 사용과 에너지 절감을 위한 비접촉 전류측정에 대한 요구가 커지고 있다. 본 연구에서는 무선 비접촉 측정을 가능하게 하는 2개의 결합코일과 전류의 인가에 의해서 인덕턴스가 변화하는 센서코일을 이용한 공진회로를 구성함으로써, 인가되는 전류의 크기에 따라 공진주파수가 변화하는 것을 이용한 비접촉 전류센서를 제안한다. 센서코일의 인덕턴스는 외부에 자석을 부착함으로써 부여되는 바이어스 자계에 의해서 자계(전류의 크기뿐만 아니라 방향을 판단할 수 있었다. 본 연구에서 구성한 비접촉 전류측정장치를 이용하여서 $-3\sim 3$ A의 전류를 측정하였을 때 18 V의 출력전압변화를 얻을 수 있었으나, 전류에 대한 출력특성은 선형적이지 않았다. 본 연구에서 제안하는 비접촉 전류측정방법(장치)를 보다 현실화시키기 위해서, 향후 출력신호의 선형화와 분해능의 엄밀한 검토가 필요하다.

주제어 : 비접촉 전류센서, 페라이트코어, 공진주파수

I. 서 론

전력의 효율적인 사용과 에너지 절감에 대한 사회적 요구가 커지고 있다. 전류를 측정하는 방법들은 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 나눌 수 있고, 직접적인 방법은 정밀한 저항에 전류를 흘리면서 저항의 전압강하를 측정하는 방법이 널리 사용되고 있으며, 간접적인 방법으로는 변류기(Current Transformer, 보통 CT로 불리운다)를 이용하는 방법, 로고우스키코일(Rogowski coil)을 이용하는 방법, 자성체코어와 홀

센서를 같이 이용하는 방법 등이 있다[1].

이러한 방법들 중에서, 수 kV 이상의 고전압 송배전선로에는 매우 높은 전류가 흐르기 때문에 대전류치를 정해진 비율에 따라 1~5 A 정도의 낮은 전류치로 변환하는 변류기가 흔히 사용된다. 보통 변류기는 2차측을 개방하였을 때 매우 큰 전압이 유기되기 때문에, 변류기를 점검, 보수 및 교체를 할 때에는 2차측을 단락시키고 작업을 실시하여야 한다[2]. 그러나, 작업자의 실수 등으로 변류기의 2차측을 단락시키지 않고 작업을 실시할 경우, 변류기의 2차측에 흐르는 전류에 의해서 감전 및 화재 사고가 발생할 수 있다[2]. 이러한 사고를 미연에 방지하기 위한 방법 중 하나로, 변류기의 2차측에서 발생하는 신호(1차측 전류에 비례하는)를 비접촉으로 신호처

리회로로 전달할 수 있는 방법에 대해서 본 연구에서는 검토하고 있다.

비접촉으로 전류를 측정하는 방법으로는 광학적인 방법을 이용하거나 Bluetooth나 ZigBee, WiFi 등의 근거리통신을 이용하는 방법, 그리고 LC 공진을 이용하는 방법 등이 제안되어 있다[3-6]. 이 중에서 LC 공진을 이용하는 방법은 전류측정과 신호전송을 수동적인 방법으로 구현할 수 있기 때문에 측정시스템을 보다 단순하고 작게 할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 페라이트코어에 설치한 1차측 권선에 흐르는 전류에 의해서 페라이트코어의 투자율이 변화하게 되고, 투자율의 변화에 의해서 공진주파수가 변화하는 현상을 이용한 비접촉식 전류센서에 대한 기초적인 연구결과를 보고한다.

II. 실험 방법

Fig. 1은 제작한 비접촉 전류센서의 등가회로와 실험에서 사용한 결합코일(Coupled coil)과 센서코일(Sensor coil)의 사진을 나타낸 것이다.

Fig. 1에서 나타낸 결합코일은 플라스틱재질의 보빈에 평균 직경 40 mm, 폭 2.5 mm로 에나멜절연 구리선(직경 0.21 mm)을 77 턴 감아서 제작하였으며, 센서코일은 1 MHz 이하의 주파수에서의 상대투자율이 1500인 Ni-Zn 페라이트코어(TDK Co., 길이 15 mm, 직경 3 mm)에 직경 0.2 mm의 에나멜절연 구리선을 160 턴 감아서 제작하였다.

100 kHz의 주파수에서 측정된 결합코일의 인덕턴스와 저항은 각각 302 μH 와 10 Ω 이었고, 센서코일(페라이트코어 포함)의 인덕턴스와 저항은 각각 74.5 μH 와 2 Ω 이었다. 제작한 센서코일과 SMD 타입의 캐패시터(500 pF)를 연결하여서 LC공진기를 구성하였고, 결합코일과 직렬로 SMD 캐패시터(50

pF)를 연결하였다. 이러한 구성으로 2개의 공진주파수를 가지는 LC 공진기를 구현할 수 있다. 센서코일에는 LC 공진기를 구성하기 위한 코일과는 별도로 전류를 인가하기 위한 코일(10 턴)을 감았다. 측정 대상이 되는 전류를 인가하기 위한 코일에 흐리는 전류에 비례하는 자계가 페라이트코어의 투자율을 변화시키므로 LC 공진기를 구성하는 코일의 인덕턴스가 변화하고, 이는 LC 공진주파수의 변화를 야기한다.

페라이트코어의 자기적 특성이 등방성이기 때문에 권선에 흐르는 전류의 방향과 상관없이 전류의 크기에만 의존하는 인덕턴스의 변화가 나타나게 된다. 따라서 Fig. 1에서 나타낸 구조로는 전류의 방향을 파악할 수가 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서, 본 연구에서는 Fig. 1에서 나타낸 센서코일의 페라이트코어 양쪽 끝에 직경 3 mm, 길이 8 mm의 NdFeB 자석을 부착하여 바이어스 자계를 인가하였다. 바이어스 자계를 인가함으로써 페라이트코어의 자화벡터(Magnetization vector)를 한쪽 방향으로 정렬시키면 권선에 흐리는 전류에 의해서 자화가 가지는 정적에너지가 변화하며, 이는 페라이트코어의 상대투자율의 변화, 즉 권선의 인덕턴스의 변화를 야기하게 된다.

등가회로 상에서의 캐패시턴스는 코일의 선간 캐패시턴스와 코일 외부에 설치한 캐패시턴스의 합으로 표시되어야 하지만, 측정된 코일 선간 캐패시터는 ~1 pF 정도로, 외부에 설치한 캐패시터에 비해서 충분히 작으므로 무시하였다. 제작한 LC 공진기의 전기적 특성(인덕턴스, 임피던스)은 LCR 미터(Hioki3532)를 이용하여서 100 kHz의 주파수에서 10 mA의 전류를 인가하면서 측정하였다. 신호발생기(Tektronix Co., AFG3021)를 이용하여서 주파수와 전압크기가 제어된 입력신호(V_m)를 공급하였고, 디지털오실로스코프(Tektronix Co., TBS1000)를 이용하여서 출력 신호의 크기 및 공진주파수를 측정하였다. Fig. 1에서 나타낸 2개의 결합코일 사이에 상호 인덕턴스(M)은 두 코일 사이의 거리에 의존한다. 본 연구에서는 두 코일 사이의 거리를 10 cm로 고정하여서 측정을 하였다.

III. 실험 결과

Fig. 2의 (a)와 (b)는 센서코일의 인덕턴스를 측정된 것으로 각각 페라이트코어의 양단에 자석을 부착하지 않은 경우(a)와 부착한 경우(b)에 대한 결과이다.

센서코일의 페라이트코어에 자석을 부착하지 않은 경우 인덕턴스는 인가되는 전류의 크기가 0~3 A로 변화함에 따라 239~219 μH 로 변화하였고, 자석을 부착한 경우 인덕턴스는 인가되는 전류의 크기(전류가 발생하는 자계의 방향은 자석에서 발생하는 자계에 대하여 반대방향)가 0~3 A로 변화함에

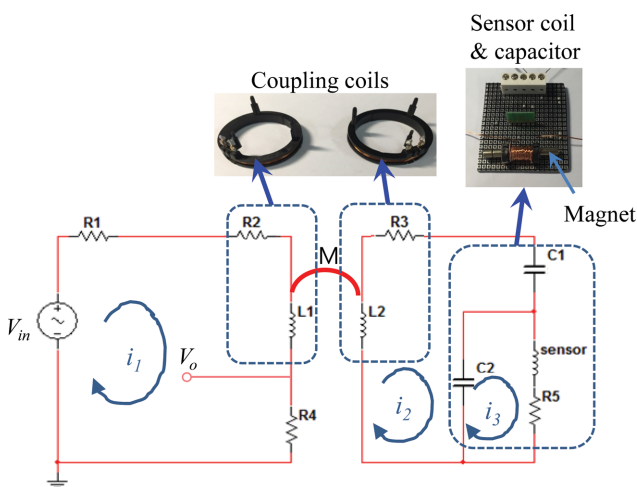


Fig. 1. (Color online) Equivalent circuit of the fabricated sensor and photographs of the coupling coils and the sensor coil.

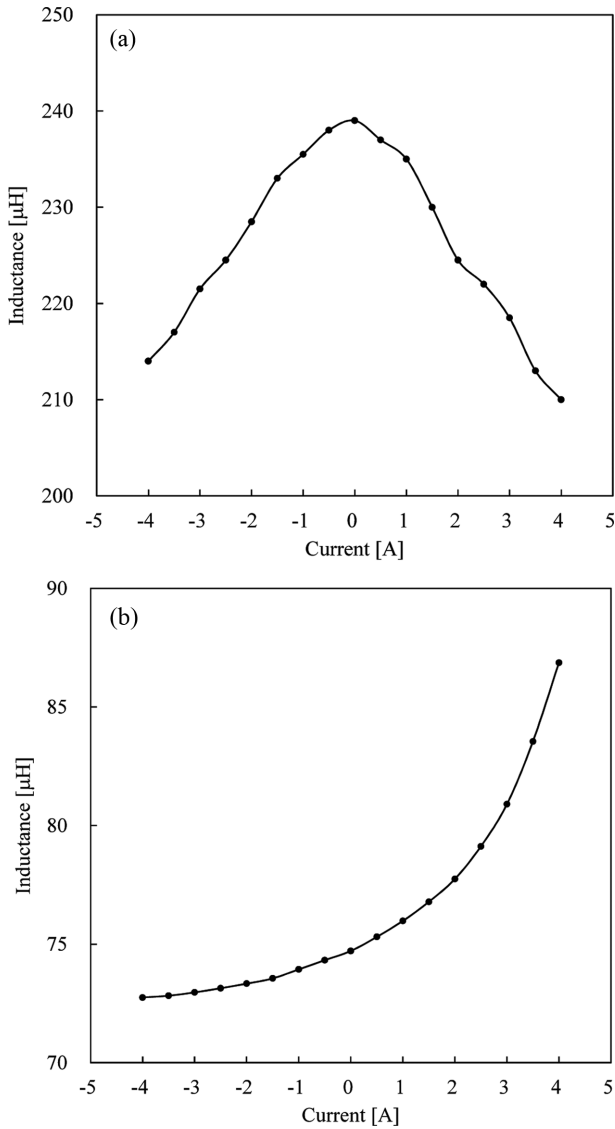


Fig. 2. Applied current dependence of inductance of the sensor coil without magnet (a) and with magnet (b).

따라 74.7~80.9 μH로 변화하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 자석을 부착하여서 바이어스자계를 인가하지 않은 경우(Fig. 2(a)), 전류의 방향에 상관없이 전류의 크기에 의존하여 인덕턴스가 작아지는 것을 알 수 있고, 이는 전류의 극성을 판단하기 어렵다는 것을 의미한다. 센서코일에 설치된 전류인가용 코일은 10 턴이며 길이는 1 cm인 솔레노이드형태이므로, 3 A의 전류인가에 의한 발생 자계($H \approx NI/l$)는 대략 3000 A/m(≈ 37.5 Oe) 정도임을 알 수 있다. 또, 솔레노이드형태의 코일에 있어서 인덕턴스는 $L = \mu_r \mu_0 (N^2 A/l)$ 로 나타낼 수 있으므로[7], 센서코일의 페라이트코어의 실효 상대투자율은, 자석이 부착되지 않았을 때 $\mu_{r,eff} = (LI/\mu_0 N^2 A) \approx 11$, 자석이 부착되었을 때 $\mu_{r,eff} \approx 2.4$ 정도로 예상된다. 여기서 실효 상대투자율은 페라이트코어의 형상자기이방성과 자석에서 발생하는 자

계의 영향을 고려한 상대투자율을 말한다. 예를 들어, 자석이 부착되지 않은 경우, 페라이트코어의 상대투자율을 $\mu_r = 1500$, 반자계계수를 $N = 0.09$ 로 가정하면 $\mu_{r,eff} = (\mu_r/1 + \mu_r N) \approx 11$ 을 알 수 있다.

Fig. 1에서 나타난 등가회로의 입력임피던스 Z_{in} 은 회로해석을 통해서 구할 수 있다. 결합코일의 인덕턴스가 결합되지 않았을 때의 각 루프의 임피던스는 각각,

$$Z_1 = R_1 + R_2 + R_4 + j\omega L_1 \quad (1)$$

$$Z_2 = R_3 + R_5 + j\left(\omega L_2 + \omega L_s - \frac{1}{\omega C_1}\right) \quad (2)$$

$$Z_3 = R_3 + j\left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_2}\right) \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서, L_s 는 센서코일의 인덕턴스를 나타낸다. 메쉬법을 이용하여서 전류 i_1, i_2, i_3 에 대한 방정식을 수립하면,

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & j\omega M & 0 \\ j\omega M & Z_2 & -(R_3 + j\omega L_s) \\ 0 & -(R_3 + j\omega L_s) & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

과 같이 나타낼 수 있으며, 전류 i_1 은 Cramer 공식을 이용하여서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_1 = \frac{\begin{vmatrix} V_{in} & j\omega M & 0 \\ 0 & Z_2 & -(R_3 + j\omega L_s) \\ 0 & -(R_3 + j\omega L_s) & Z_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Z_1 & j\omega M & 0 \\ j\omega M & Z_2 & -(R_3 + j\omega L_s) \\ 0 & -(R_3 + j\omega L_s) & Z_3 \end{vmatrix}} \quad (5)$$

$$i_1 = \frac{V_{in}(Z_2 Z_3 - (R_3 + j\omega L_s))}{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_3 \omega^2 M^2 - Z_1 (R_3 + j\omega L_s)^2} \quad (6)$$

Fig. 1에서의 입력임피던스 $Z_{in} = (V_{in}/i_1)$ 이므로,

$$Z_{in} = \frac{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_3 \omega^2 M^2 - Z_1 (R_3 + j\omega L_s)^2}{Z_2 Z_3 - (R_3 + j\omega L_s)^2} \quad (7)$$

이다.

Fig. 3은 식(7)을 이용하여서 계산한 결과로 Fig. 1에서 나타난 등가회로에서 $L_1 = L_1 = 302 \mu H$, $L_s = 74.7$ 혹은 $80.9 \mu H$ 를 이용하여서 계산한 것이다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이, 입력 임피던스의 주파수특성에서

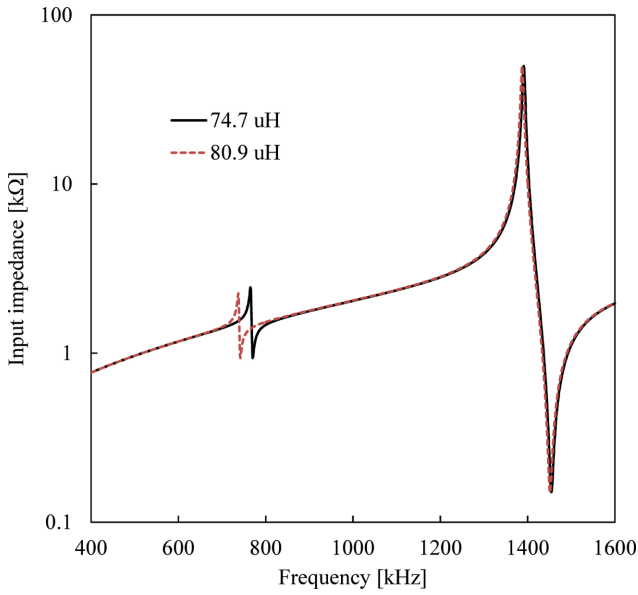


Fig. 3. (Color online) Frequency dependence of input impedance of the sensor coil.

는 2개의 공진 피크를 발견할 수 있다. 높은 주파수에서 나타나는 공진 피크는 센서코일의 인덕턴스변화에 의존하지 않는 반면, 낮은 주파수에서 나타나는 공진 피크는 인덕턴스의 변화에 따라 변화함을 알 수 있다. $L_s = 74.7 \mu\text{H}$ 일 때, 즉 전류인가 코일에 전류가 인가되지 않았을 때의 첫 번째 공진 주파수는 768 kHz였고, $L_s = 80.9 \mu\text{H}$ 일 때, 즉 전류가 3 A 흘렀다고 가정되었을 때의 첫 번째 공진 주파수는 740 kHz였다.

Fig. 4는 센서코일의 전류인가 권선에 전류를 인가함에 따라 변화하는 공진주파수(Fig. 3에서 첫 번째 공진)를 측정한다.

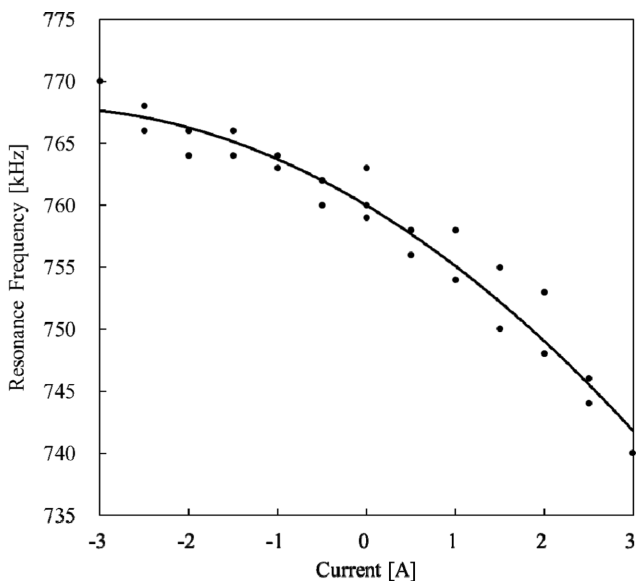


Fig. 4. Applied current dependence of resonance frequency.

결과이다.

인가되는 전류가 $-3 \sim +3 \text{ A}$ 로 변화함에 따라서 공진주파수는 대략 767~742 kHz로 변화하고 있다. 이는 앞서서도 말한 바와 같이, 인가되는 전류에 비례하여 발생하는 자계가 페라이트코어의 인덕턴스를 변화시키고, 인덕턴스의 변화에 의해서 공진주파수가 변화하는 것이다. Fig. 4에서 나타낸 공진주파수를 측정하기 위해서 디지털오실로스코프를 이용하였기 때문에 주파수의 구분, 즉 분해능이 좋지 않았다. 향후 본 연구에서 제안하는 방법의 전류측정에 있어서, 분해능에 대한 엄밀한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 제안하는 비접촉 전류측정방법은 센서코어에 설치된 전류인가권선에 흐르는 전류에 비례하는 공진주파수의 변화를 읽음으로써 이루어질 수 있다. 그러나, 이러한 방법으로 전류를 측정하기 위해서는 주파수를 변환시킬 수 있는 전원장치와 공진주파수를 자동으로 읽어낼 수 있는 장치가 필요하기 때문에, 신호처리회로를 구성하는 관점으로는 바람직하다고 볼 수 없다.

Fig. 5는 측정 주파수를 783 kHz로 고정하고 전류인가에 대한 출력전압을 측정한 것이다. 인가되는 전류가 $-3 \sim +3 \text{ A}$ 로 변화함에 따라 출력 전압은 14~32 V로 변화하였으며, $\Delta V / \Delta I = 3 [V/A]$ 의 평균변화율을 나타내었다. 그러나, Fig. 5에서 알 수 있듯이, 측정되는 전류영역 ($-3 \sim +3 \text{ A}$)에서 인가전류에 대한 출력전압은 선형적이지 않았다. 그 이유는 바이어스 자계를 인가하기 위한 자석에서 발생하는 자계가 적절한 크기를 가지지 않기 때문인 것으로 파악된다. 즉, 전류가 인가되지 않은 상태에서 페라이트코어의 자화는 거의 포화가 된 상태이므로, $0 \sim 3 \text{ A}$ 사이에서 발생하는 자계(자석의 자계와 같

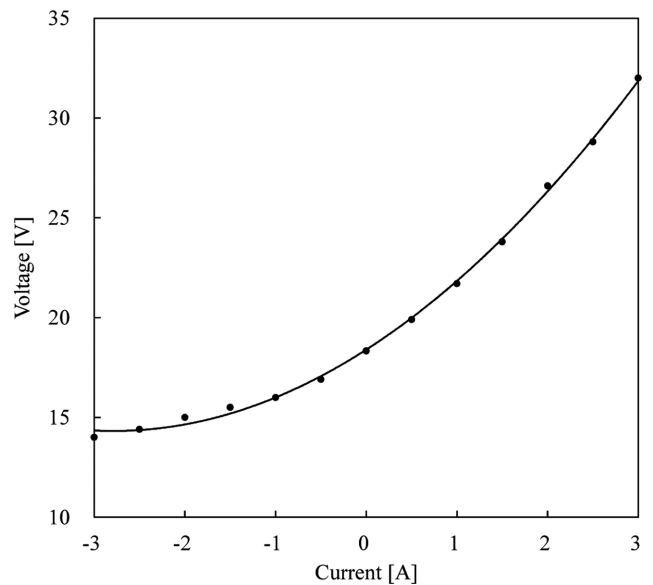


Fig. 5. Applied current dependence of output voltage.

은 방향)는 페라이트코어의 자화에 큰 영향을 미치지 못하며, 이 영역의 전류(자계)에 의해서, 페라이트코어의 투자율은 물론 센서코일의 인덕턴스의 변화에도 크게 영향을 미치지 못하기 때문인 것으로 생각된다. 이는 Fig. 2(b)에서 나타낸 인가전류에 대한 인덕턴스 측정결과에서도 발견할 수 있다. Fig. 2(b)에서, 0~3 A의 전류영역에서 인덕턴스는 0~3 A의 전류영역에 비하여 변화량이 작다. 이 문제를 개선하기 위해서는 적절한 바이어스 자계를 인가할 수 있는 방법이 필요하며, 자석의 형상과 크기, 혹은 자석의 잔류자속밀도 등을 최적화함으로써 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 비접촉 전류측정장치를 개발하기 위해서, 공심 결합코일과 페라이트코어에 전류인가코일과 인덕턴스측정코일을 감아서 제작한 센서코일을 이용하여서 LC 공진기를 제작하고 그 특성을 분석하였다.

센서코일의 인덕턴스는 외부에 자석을 부착함으로써 부여되는 바이어스 자계에 의해서 자계(전류)의 크기뿐 아니라 방향을 판단할 수 있게 되었다. 인가전류를 0~3 A로 변화시킴에 따라 인덕턴스는 74.7~80.9 μH 로 변화하였고, 이는 공진주파수의 변화로 나타났다. 본 연구에서 구성한 비접촉 전류측정장치를 이용하여서 -3~3 A의 전류를 측정하였을 때

18 V의 출력전압변화를 얻을 수 있었다. 그러나, 인가 전류에 대한 출력특성은 선형적이지 않았는데, 이는 자석부착을 통한 바이어스 자계의 크기가 적절하지 못하였기 때문으로 파악되었다. 본 연구에서 제안하는 비접촉 전류측정방법(장치)를 보다 현실화시키기 위해서, 향후 출력신호의 선형화와 분해능의 엄밀한 검토가 필요하다.

References

- [1] Bryan Yarborough, Power Electronics Technology (2012) pp. 28~32.
- [2] S. W. Choi and K. C. Song, J. Korean Society of Safety **22**, 20 (2007).
- [3] H. Okada and T. Itoh, Wireless Sensor Network (2013) pp. 223~228.
- [4] E. Chobot, D. Newby, R. Chandler, N. Abu-Mulaweh, C. Chen, and C. Pomalaza-Ráez, International Journal of Embedded Systems and Applications (IJESA) **3**, 1 (2013).
- [5] A. J. DeRouin, B. D. Pereles, T. M. Sansom, P. Zang, and K. G. Ong, J. Sens. Technol. **3**, 63 (2013).
- [6] J. Zubia, L. Casado, G. Aldabaldetrek, A. Montero, E. Zubia, and G. Durana, Sensors **13**, 13584 (2013).
- [7] D. Howard Dellinger, L. E. Whittmore, and R. S. Ould, Radio Instruments and Measurements 248 (1924).