

Multipoint Measurement One Dimensional Sensor Array using LC Resonance

Kwong-Won Kim and Kwng-Ho Shin*

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

(Received 17 April 2020, Received in final form 27 April 2020, Accepted 27 April 2020)

In this paper, we report the results of investigating the effect of a magnetic field on the resonance frequencies of a sensor array composed of three LC resonance elements. An LC resonator was fabricated using a ceramic capacitor and an inductor fabricated with a Ni-Zn ferrite core. Three LC resonators were connected in parallel to form a simple sensor array. The change in resonance frequency was observed while applying a magnetic field to each LC resonance element. Since the resonance frequency of each LC resonance element is different to others, even if the resonance frequency of an individual resonance element changes due to a magnetic field, there is no change in the resonance frequencies of other adjacent resonance elements. Therefore, when constructing a sensor array using LC resonant elements in the manner proposed in this paper, it was found that multiple sensor signals can be acquired with only a pair of wires.

Keywords : ferrite core, LC resonance, sensor array

LC 공진을 이용한 다점 측정 1차원 센서 어레이

김경원 · 신광호*

경성대학교 정보통신공학과, 부산시 남구 대연동 110-1, 48434

(2020년 4월 17일 받음, 2020년 4월 27일 최종수정본 받음, 2020년 4월 27일 게재확정)

본 논문에서는 다수의 센서로 구성된 센서 어레이의 신호 처리를 위한 연결선을 줄일 수 있는 방법으로서, LC 공진을 이용하는 방법에 대해서 조사한 결과를 보고한다. Ni-Zn 페라이트 코어를 이용하여서 제작한 인덕터와 세라믹 캐패시터를 이용하여서 LC 공진 소자를 제작하였고, 3개의 LC 공진 소자를 병렬 연결하여 간단한 센서 어레이를 구성하였다. 개별 LC 공진 소자에 자계를 인가하면서 공진 주파수의 변화를 관찰하였다. 센서 어레이를 구성하는 각 LC 공진 소자의 공진 주파수를 서로 다르게 설정하였기 때문에 개별 공진 소자의 공진 주파수가 자계의 영향으로 변화하여도 인접하는 다른 공진 소자의 공진 주파수에는 변화가 없었다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 방식으로 LC 공진 소자를 이용한 센서 어레이를 구성하는 경우, 2선만으로 다수의 센서 신호를 취득할 수 있음을 알 수 있었다.

주제어 : 페라이트 코어, LC 공진, 센서 어레이

I. 서 론

최근 4차산업을 선도할 핵심 기술 중 하나로 IoT 기술이 부각되고 있다. IoT 기술은 지능화된 사물들을 인터넷에 연결하여, 기존에 사람과 사람간에 소통을 뛰어넘어 사람과 사물은 물론, 사람의 개입 없이 사물과 사물간의 통신 기술도 포함하고 있다. 인터넷에 연결되는 사물, 즉 IoT의 개발은 매년 괄목하게 성장하고 있으며[1,2], 막대한 경제적/산업적 영향을 미치면서 사회 전반의 변화를 야기할 것이다. 고도화된

IoT 네트워크를 구현하기 위해서는 초소형 디바이스 기술, 네트워크 기술, 플랫폼 기술과 함께 스마트 센서를 이용하여서 사물이 필요한 정보/데이터를 취득할 수 있도록 하는 기술이 필요하다[3]. IoT 기술이 산업 전반에 영향을 끼치게 될 것이 자명한 현실에서 기존의 센서의 성능을 뛰어넘거나 새로운 개념의 센서들의 개발이 필수불가결하다.

센서 어레이는 1차원 혹은 2차원으로 센서를 배열하여 센서들이 설치된 지점 혹은 센서들의 감지 대상 공간의 물리적/화학적 양을 전기적으로 변환한다. 가장 일반적인 센서 어레이의 예는 스마트폰에 사용되는 이미지 센서[4]와 터치 센서[5,6]이다. 그 이외에도 자동차의 위치나 움직임을 감지하는 센서 어레이[7], 전동기의 회전자 위치를 판별하기 위한 홀센

© 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

서 어레이[8] 등 다양한 응용을 위해서 센서 어레이가 개발되고 있다. 센서 어레이의 신호 처리를 위해서는 단순히 개별 센서의 신호를 처리하는 방법이나 시분할(Time division)된 개별 센서의 신호들을 다중화(Multiplexing)하여 처리[9]할 수 있으나, 센서 수가 많아짐에 따라 신호 연결선이 많아지는 단점이 있다. 신호 연결선이 많아지고 복잡해 지는 것은, 특히 자동차 내부나 전동기와 같이 한정된 공간에 센서를 설치해야 하는 경우 설치 및 신호 처리에 어려움이 발생할 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 본 연구에서는 LC 공진 주파수를 달리하는 센서들을 나열하여 제작한 센서 어레이를 개발하고 있다. 복수의 센서들을 동일한 연결선으로 신호를 처리하는 경우에도 LC 공진 주파수가 다른 센서들로부터 얻어지는 신호들이 인접한 다른 센서 소자의 신호에 영향을 주지 않는다면 센서 어레이를 구성하는 센서 소자의 수가 많아지더라도 적은 수의 연결선으로 신호를 처리할 수 있다.

본 논문에서는 외부 자계에 따라 LC 공진 주파수가 변화하는 3개의 LC 공진 소자를 직렬로 연결한 센서 어레이의 자계 검출에 대해서 보고한다. 본 논문의 실험 결과로, 복수의 센서 소자를 2선으로 직렬 연결하고 주파수를 변화시키면서 센서를 구동하면 자계가 인가된 센서 소자의 공진 주파수만 변화하게 되고 인접한 다른 센서소자의 공진 주파수에는 영향을 미치지 않는다는 것을 확인하였다.

II. 실험 방법 및 계산 방법

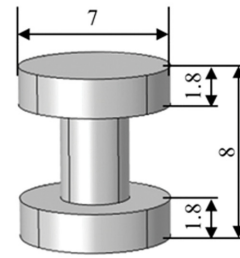
LC 공진 소자는 Ni-Zn 페라이트에 권선을 감아서 제작한 인덕터와 세라믹 캐패시터를 직렬로 연결한 구조로 제작하였다. Fig. 1(a)와 (b)는 각각 본 실험에 사용한 Ni-Zn 페라이트 코어의 사진과 치수를 기입한 개략도를 나타내고 있으며, 치수의 단위는 mm이다. Fig. 1(c)는 페라이트 코어에 권선을 감은 사진이며, 직경 0.1 mm의 에나멜 절연 구리선을 160번 감은 인덕터이다. 제작한 인덕터의 인덕턴스는 1 kHz일 때 1.03 mH였으며, 100 kHz일 때 9.98 mH로, 1~100 kHz의 주파수 대역에서 인덕턴스는 큰 변화를 나타내지 않았다.

Fig. 2는 각각 제작한 인덕터와 세라믹 캐패시터를 이용하여 제작한 센서 어레이의 사진(a)과 등가회로(b)를 나타낸 것이다. 센서 어레이는 30 cm 정도의 길이를 가지며, 3개의 LC 공진 소자로 구성되어 있다.

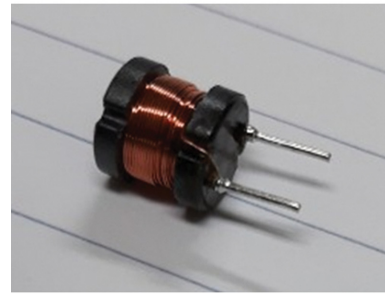
공진 주파수를 조정하기 위해서 인덕터와 직렬로 연결된 캐패시터는 $C_1 = 11 \text{ nF}$, $C_2 = 33 \text{ nF}$, $C_3 = 680 \text{ nF}$ 의 캐패시턴스 값을 가진다. 인덕터의 직렬 저항 R_1, R_2, R_3 은 인덕터를 구성한 구리 권선의 저항값을 나타내며, 직류에서는 2.7Ω 이었다. 구리의 도전율 $5.7 \times 10^7 \text{ S/m}$ 을 이용하여 100 kHz에서의



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. (Color online) Photograph (a) and schematic view (b) of the Ni-Zn ferrite core and the fabricated inductor (c) with the ferrite core.

표피 깊이($\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$)를 구하면, $\delta \approx 210 \mu\text{m}$ 이다. 권선을 위해서 사용한 구리선의 반경이 $50 \mu\text{m}$ 이므로, 100 kHz 이하에서는 표피 효과로 인한 저항의 증가가 거의 발생하지 않을 것으로 예상할 수 있다. 따라서, Fig. 2(b)에서 나타난 등가 회로에서 인덕터의 권선 저항(R_1, R_2, R_3)은 ~100 kHz의 동작 주파수와 동일하게 고려할 수 있다.

Fig. 2(b)의 등가 회로에서 $L_4 \sim L_9$ 는 각 LC 공진 소자들을 연결한 선들의 인덕턴스를 나타낸 것이다. LC 공진 소자들을 연결하기 위해서 직경 0.3 mm의 구리선을 사용하였고, 각 연결선의 길이가 ~10 cm인 점을 고려하면 연결선의 인덕턴스는 대략 100 nH 정도라는 것을 알 수 있다[10]. 본 실험에서의 최대 주파수는 100 kHz 정도이며, 100 kHz에서 연결선이 가지는 리액턴스값(ωL)은 ~63 m Ω 정도이다. 즉, 연결선이 가지는 리액턴스는 다른 소자값에 비해서 충분히 작으므로 계산을 위해서 무시하여도 무방하다. Fig. 2(b)와 같은 등가 회로는 회로 방정식을 풀어서 해석할 수 있다. 인덕터 A와 캐패시터로 구성된 가지들의 부분 임피던스와 어디미턴스는,

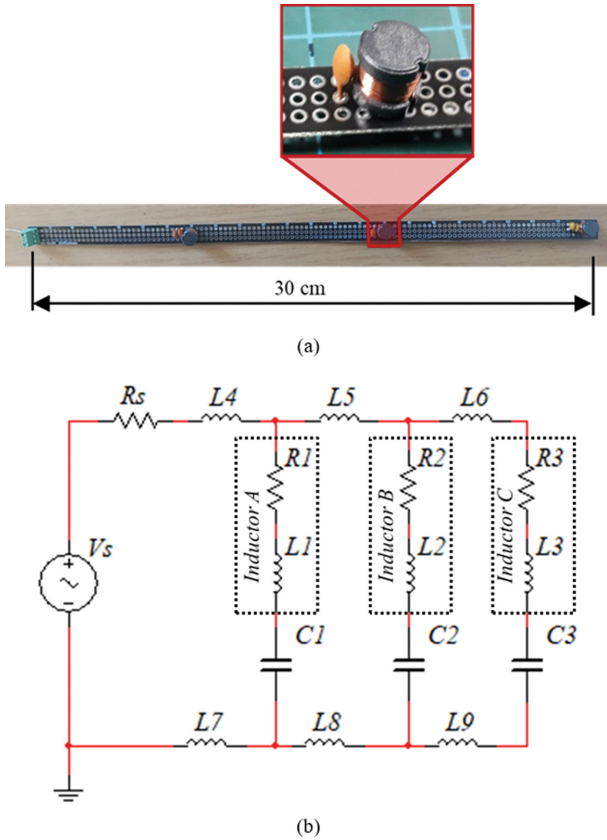


Fig. 2. (Color online) Photograph (a) and equivalent circuit (b) of the constructed sensor array.

각각,

$$Z_i = R_i + j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i} \quad (1)$$

$$Y_i = \frac{1}{Z_i} \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서, $i=1\sim 3$ 이다. 각 LC 공진 소자들은 병렬로 연결되어 있으므로, 병렬 회로 가지들의 등가 어드미턴스 Y_{eq} 는,

$$Y_{eq} = \sum_{i=1}^6 Y_i \quad (3)$$

이다. LC 공진 소자들의 등가 임피던스 Z_{eq} 와 전원에서 본 입력 임피던스 Z_{in} 는 각각,

$$Z_{eq} = \frac{1}{Y_{eq}} \quad (4)$$

$$Z_{in} = R_s + Z_{eq} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 전원에서 입력되는 전류 I_{in} 은 구동 전압

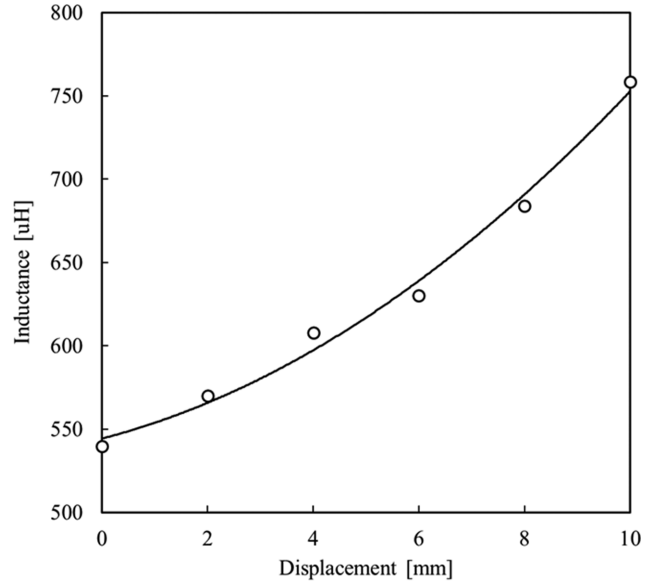


Fig. 3. Magnet displacement dependence of inductance of the fabricated inductor.

V_s 와 입력 임피던스 Z_{in} 의 비를 이용하여서 구할 수 있다.

제작된 인덕터의 인덕턴스는 LCR 미터(HIOKI 3552-20)를 이용하여서 측정하였다. 센서 어레이에 교류 전력은 바이폴라 전원(NF BP4610)을 이용하여서 주파수(1~70 kHz)와 진폭을 조정하면서 공급하였다.

제작된 센서소자에, 인접센서에 영향을 미치지 않고, 자계를 인가하기 위해서 지름 15 mm, 두께 3 mm의 페라이트 자석을 근접시켰다. 페라이트 자석의 표면에서 측정된 자계는 690 Oe였으며, 접근 거리를 달리하면서 센서소자에 인가되는 자계를 조정하였다.

III. 실험 결과

Fig. 3은 페라이트 자석과 LC 공진 소자를 구성하는 인덕터 사이의 거리를 변화시키면서 측정된 인덕턴스를 나타낸 것이다. 이 때, 측정 주파수는 20 kHz였으며, 인가 전류는 10 mA로 하였다. 제작한 인덕터코일의 인덕턴스는 1 mH였으나 페라이트 자석을 밀착시켜서 자계를 인가하면 인덕턴스 값은 540 μ H로 작아진다. 페라이트 자석의 근접 거리를 늘여감에 따라 인덕턴스는 점차 커지고 대략 20 mm 이상 이격 시켰을 때 인덕턴스는 1 mH로 일정한 값을 유지하였다. 이는 자석에 의해서 인가된 외부 자계에 의해 인덕터를 구성하는 Ni-Zn 페라이트의 투자율이 감소하기 때문이다. 자석과 인덕터 사이의 간격이 커질수록 인덕터의 투자율은 외부 자계의 영향을 적게 받으므로 인덕턴스 값이 원래의 값으로 회복되는 것을 알 수 있다.

Fig. 3에서 나타난 자석과의 거리에 따르는 인덕턴스의 변화는 자석에 의해서 인가되는 자계에 의해서 페라이트 코어의 실효 투자율(Effective permeability)이 변화하였기 때문이다. 실효 투자율은 재료의 투자율에 반자계 계수를 감안한 투자율을 말하며, 외부 자계가 인가되었을 때에는 Zeeman에너지의 변화로 인해서 투자율이 변화하게 된다. Fig. 1의 (a)와 (b)에서 나타난 것과 같은 구조에서의 정확한 실효 투자율은, 반자계 계수를 정확하게 산출하기가 어렵기 때문에, 계산하기 쉽지가 않다[11,12]. 그러나, 반자계 계수는 페라이트 코어의 형상에 의해서 결정되는 것이므로, 투자율은 외부 자계에 의해서 변화한다고 할 수 있다. 상대 투자율(Relative permeability) μ_r 는 포화 자화(Saturation magnetization) M_s 와 자기이방성을 이용하여 식(6)과 같이 나타낼 수 있다[13].

$$\mu_r = \frac{\mu_0 M_s^2}{2(K_z + K_0)} + 1 \quad (6)$$

여기서, μ_0 는 진공투자율을 나타내고, K_z 는 Zeeman에너지에 의한 자기이방성을 나타낸다. $K_z = H_{ex} M_s$ 이고, H_{ex} 는 외부에서 인가된 자계이다. 그리고, K_0 는 형상자기이방성, 결정자기이방성, 자기탄성이방성을 합친 것을 표현하였다. 식(6)에 의하면, 외부 자계에 의해서 투자율이 변화한다는 것을 알 수 있다. 솔레노이드 형상을 가진 인덕터의 인덕턴스는,

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 S}{l} \quad (7)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서, N 은 코일의 권선수, S 는 코일의 면적, l 은 솔레노이드 코일의 길이를 나타낸다. Fig. 1에서 나타난 페라이트 코어가 원통형이 아니기 때문에 식(7)을 이용하여서 정확한 인덕턴스를 계산할 수는 없다. 그러나, 식(6)과 (7)을 이용하여서 투자율 혹은 외부 자계에 의해서 인덕턴스가 변화한다는 것을 알 수 있다. Fig. 3(b)에서 나타난

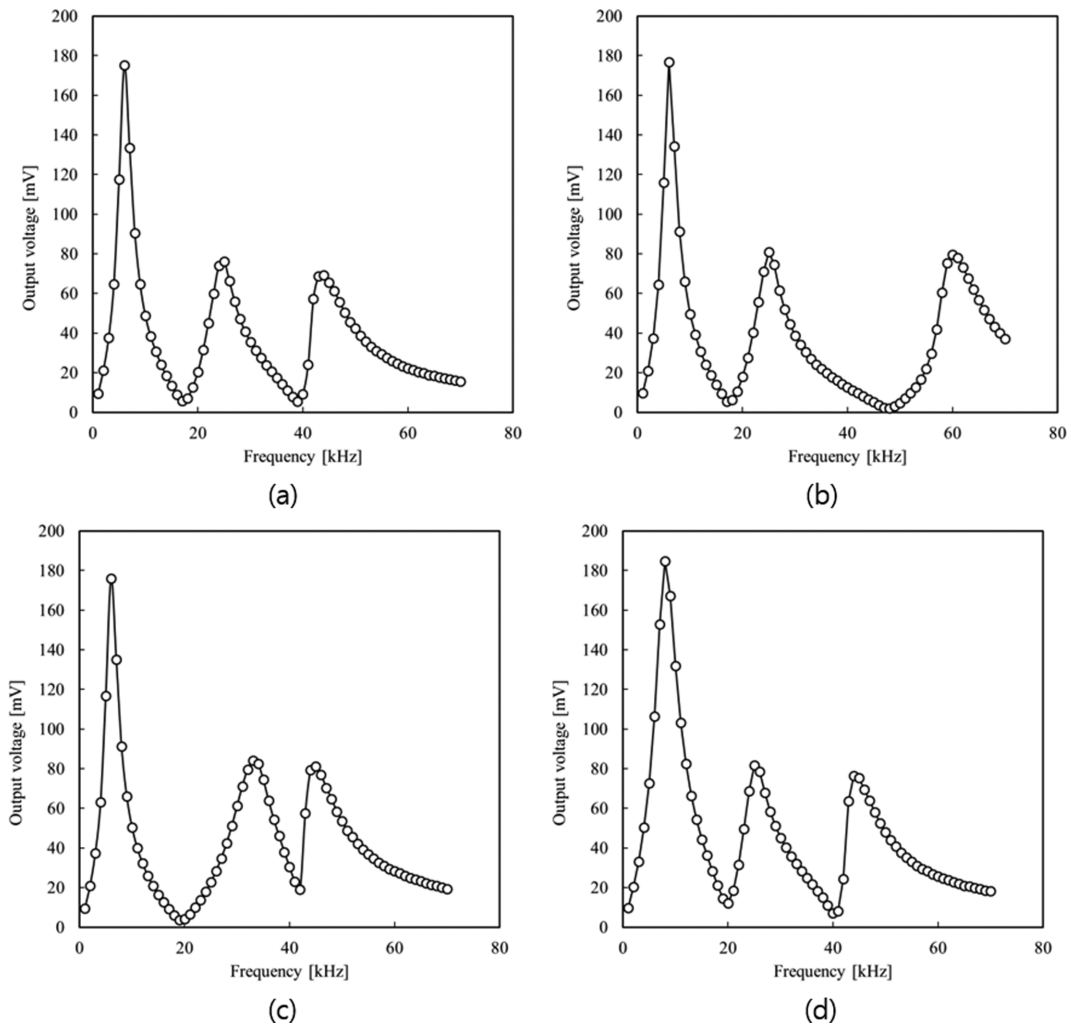


Fig. 4. Frequency dependencies of output voltages measured without magnet (a), with magnet attached on inductor 1 (b), inductor 2 (c) and inductor 3 (d).

Table I. Measured and calculated resonant frequencies according to magnet position.

	1 st resonance f_r [kHz]		2 nd resonance f_r [kHz]		3 rd resonance f_r [kHz]	
	Measured	Calculated	Measured	Calculated	Measured	Calculated
Without magnet	6	6.1	25	27	44	48
Magnet on L_1	6	6.1	25	27	60	65
Magnet on L_2	6	6.2	33	37.7	44	48
Magnet on L_3	8	8.3	25	27	44	48

등가 회로에서와 같이, 인덕터와 캐패시터를 직렬로 연결한 LC 공진 소자의 공진 주파수 f_r 은,

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

로 표현할 수 있다. 따라서, 식(6)에 의해서 외부 자계에 의해서 투자율이 변화하며, 식(7)에 의해서 투자율에 따라 인덕턴스가 변화하며, 식(8)에 의해서 인덕턴스에 따라 공진 주파수가 변화한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 센서 어레이에 인가되는 전류의 주파수를 변화시키면서 출력 전압(R_L 에 걸리는 전압)을 측정된 결과이다. Fig. 3(a)는 자석을 근접시키지 않았을 때의 결과이며, Fig. 3의 (b), (c), (d)는 각각, Fig. 2(b)의 등가 회로 상에서의 Inductor 1, Inductor 2, Inductor 3에 자석을 접촉시킨 경우, 즉 690 Oe의 자계를 인가한 경우의 출력 신호의 주파수 특성을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이, 3개의 LC 공진 소자의 공진 주파수에 부합하는 3개의 공진 특성을 나타내고 있다. 인덕터의 저항을 무시하면, LC 공진 소자의 공진 주파수 f_r 는 식(8)을 이용해서 구할 수 있으며, Fig. 2(b)의 등가 회로 상에서 나타난 Inductor 1과 캐패시터 1의 직렬 가지에 해당하는 공진 주파수는 48 kHz, Inductor 2와 캐패시터 2의 직렬 가지에 해당하는 공진 주파수는 27 kHz, Inductor 3과 캐패시터 3의 직렬가지에 해당하는 공진 주파수는 6.1 kHz로 계산되었다. Fig. 4(a)의 실험 결과에서 나타난 공진 주파수는 각각 44 kHz, 25 kHz 그리고 6 kHz였으며, 계산 결과와 다소 차이가 있으나 실험에 사용한 세라믹 캐패시터의 오차범위(10%)를 감안하면 충분히 받아 들일 수 있는 결과이다. Fig. 4(b)는 Inductor 1에 자계를 인가한 경우로 3번째 공진 주파수가 44 kHz(자계가 인가되지 않았을 때)에서 60 kHz로 변화하였다. Fig. 4(c)는 Inductor 2에 자계를 인가한 경우로 2번째 공진 주파수가 25 kHz(자계가 인가되지 않았을 때)에서 33 kHz로 변화하였다. Fig. 4(d)는 Inductor 3에 자계를 인가한 경우로 1번째 공진 주파수가 6 kHz(자계가 인가되지 않았을 때)에서 8 kHz로 변화하였다.

Fig. 4에서 주목할 만한 결과는 3개의 공진 소자가 병렬로 연결되어 있으나, 각 공진 소자의 공진 주파수 변화가 다른 공진 소자의 공진 주파수에는 영향을 미치지 않는다는 것이

다. 예를 들어, Fig. 4(b)는 Inductor 1에 외부자계를 인가한 경우이며, Inductor 1과 캐패시터 1에 의해서 발생하는 공진 주파수에만 변화(44 kHz \rightarrow 60 kHz)가 있고, 다른 두개의 공진 주파수에는 거의 영향을 미치지 않는다.

Table I은 LC공진소자의 인덕터에 자석을 이용하여 자계를 인가한 경우 공진특성 변화에 대한 실험 결과를 정리한 것이다. 여기서, 자계를 인가한 경우의 공진 주파수는 Fig. 3의 실험 결과, 즉 자석을 밀착시켰을 때의 인덕턴스 값 540 μ H를 이용하였다.

Fig. 4와 Table I에서 정리한 결과를 통하여 본 연구에서 제안하고 있는 LC 공진 소자를 이용한 센서 어레이는 2선을 이용하여 다수의 센서(본 논문에서는 3개의 센서)의 신호를 동시에 계측할 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 병렬로 연결된 다수의 센서에 있어서, 자계가 인가된 공진 소자에 해당하는 공진 주파수만 변화가 발생하며 다른 공진 소자에는 전기적으로 영향을 미치지 않는다는 것이다. 본 연구에서 제안하고 있는 LC 공진형 센서 어레이는 1차원으로 배열된 다수의 센서의 신호를, 주파수를 변화시키면서 공진 특성을 계측함으로써, 오로지 2선만으로 개별 센서에 미치는 자계의 영향을 측정할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 LC 공진형 센서 어레이를 이용하여서 인가되는 외부 자계값을 정확히 측정하는 연구는 아직까지 이루어지지 않았다. 식(6)~(8)을 이용하면 외부 자계에 의해서 공진 주파수가 변화한다는 것을 알 수 있으나, 아직까지 페라이트 형상에 따르는 실효 투자율을 정확하게 계산할 수 없었기 때문에 외부 자계에 대한 정량적인 결과를 얻을 수 없었다. 측정된 공진 주파수로부터 정확한 외부 자계를 구하는 정량적인 방법에 대해서 향후 연구가 필요하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 3개의 LC 공진 소자를 병렬 연결한 센서 어레이에 공진 주파수에 미치는 자계의 영향에 대해서 조사한 결과를 보고 하였다. LC 공진소자를 구성하는 인덕터에 자석을 근접시킴으로써 자계를 가하면서 인덕턴스의 변화를 조사한 결과 근접 거리에 따라 인덕턴스가 변화하는 것을 알 수 있었고, 이는 인덕터를 구성하는 페라이트의 투자율이 외

부 자계에 따라 변화하기 때문인 것으로 파악되었다. 센서 어레이를 구성하는 각 LC 공진 소자의 공진 주파수를 서로 다르게 설정하고, 개별 공진 소자에 자계를 가함으로써 공진 주파수를 변화시켰을 때 이웃하는 공진 소자의 공진 주파수에는 영향이 없었다. 본 논문에서는 외부 자계에 따라 LC 공진 주파수가 변화하는 3개의 LC 공진 소자를 직렬로 연결한 센서 어레이의 자계 검출에 대해서 보고하였다. 본 논문의 실험 결과로, 복수의 센서 소자를 2선으로 직렬 연결하고 주파수를 변화시키면서 센서를 구동하면 자계가 인가된 센서 소자의 공진 주파수만 변화하게 되고 인접한 다른 센서 소자의 공진 주파수에는 영향을 미치지 않는다는 것을 확인하였다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 방식으로 구성된 센서 어레이의 경우, 2선만으로 다수의 센서를 연결하여도 공진 주파수를 측정함으로써 개별센서의 공진 주파수의 변화, 즉 공진 주파수의 변화를 야기하는 자계를 측정할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

References

- [1] P. Aswale, A. Shukla, P. Bharati, S. Bharambe, and S. Palve, Information and Communication Technology for Intelligent Systems, Springer, 299 (2018).
- [2] C. L. Irene and S. Wakenshaw, Int. J. Res. Mark. **34**, 3 (2017).
- [3] M. U. Farooq, M. Waseem, S. Mazhar, A. Khairi, and T. Kamal, Int. J. Comp. Appl. **113**, 1 (2015).
- [4] M. Bigas, E. Cabruja, J. Forest, and J. Salvi, Microelectron. J. **37**, 433 (2006).
- [5] Y. Al-Handarish, O. M. Omisore, T. Igbe, S. Han, H. Li, W. Du, J. Zhang, and L. Wang, Adv. Mater. Sci. Eng. **2020**, 1 (2020).
- [6] O. K. Kwon, J. S. An, and S. K. Hong, IEEE Sens. J. **18**, 4832 (2018).
- [7] X. Zhou, 2013 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings, 1 (2013).
- [8] H. J. Ahn and K. R. Kim, Int. J. Precis. Eng. Manuf. **1**, 125 (2014).
- [9] K. Cui, Z. Ren, J. Qian, W. Peng, and R. Zhu, Sensors **18**, 3548 (2018).
- [10] F. W. Grover, Inductance Calculations, Dover Publications (2004).
- [11] M. Sato and Y. Ishii, J. Appl. Phys. **66**, 983 (1989).
- [12] A. Smith, K. K. Nielsen, D. V. Christensen, C. R. H. Bahl, R. Bjrk, and J. Hattel, J. Appl. Phys. **107**, 103910 (2010).
- [13] Y. Yan, L. D. Geng, L. Zhang, X. Gao, S. Gollapudi, H. C. Song, S. Dong, M. Sanghadasa, K. Ngo, Y. U. Wang, and S. Priya, Sci. Rep. **7**, 16008 (2017).