

페라이트 코어를 이용하여 제작한 직교형 플럭스게이트 센서의 감도에 미치는 구동주파수의 영향

신광호*

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

(2012년 11월 19일 받음, 2012년 12월 10일 최종수정본 받음, 2012년 12월 10일 게재확정)

원통형 페라이트 코어와 검출 코일을 이용하여 직교형 플럭스게이트 센서를 제작하고, 구동주파수가 출력 감도에 미치는 영향에 대해서 조사하였다. 외부 자계에 대한 플럭스게이트 센서의 출력은 코어의 단면적, 권선수, 구동주파수 등에 비례한다. 따라서, 센서를 소형화시키면서 출력(감도)을 저하시키는 것을 방지하기 위해서는 구동주파수를 높이는 것이 필요하다. 그러나, 구동주파수는 자성체 코어의 주파수특성, 구동회로의 성능, 검출 코일의 주파수특성 등 다양한 요인으로 제한 된다. 본 연구에서는 원통형 페라이트 코어와 검출 코일을 이용하여 제작한 직교형 플럭스게이트 센서에 있어서 센서 출력의 주파수특성과 검출 코일의 인덕턴스와 캐패시턴스를 측정하여서 상호 연관성에 대해서 살펴보았다. 그 결과 외부 자계에 대한 센서의 출력은 검출 코일의 임피던스에 의존한다는 것을 알 수 있었고, 검출 코일의 LC공진주파수에서 높은 출력(감도)을 얻을 수 있었다.

주제어 : 직교형 플럭스게이트, 페라이트 코어, 구동주파수, LC공진

I. 서 론

고감도 자기센서로서 다양한 분야에 이용되고 있는 플럭스게이트(fluxgate)센서는 여자 자계(excitation magnetic field)와 외부 자계의 방향관계에 따라서 평행형(parallel type)과 직교형(orthogonal type)으로 나눌 수 있다[1]. 오랫동안 평행형 플럭스게이트 센서가 주류를 이루면서 연구 개발되어 왔다. 특히, 외부 자계에 대한 제2고조파 출력의 의존성을 이용하는 평행형 플럭스게이트 센서는 동기검파를 통해서 신호 대 노이즈비(signal to noise ratio)를 높임과 동시에 높은 분해능을 확보할 수 있기 때문에 고감도 자기 센서를 구성하기 위한 표준처럼 인식되어 왔다[1-4]. 일반적으로 평행형 플럭스게이트 센서는 자성체코어의 원주방향으로 감긴 여자(excitation) 코일에 교류전류를 흘림으로써 자성체코어의 길이방향(외부자계를 측정하고자 하는 방향)으로 여자를 시키는 반면, 직교형 플럭스게이트 센서는 자성체코어의 원주방향으로 여자자계를 발생시킨다. 직교형 플럭스게이트 센서에서 자성체의 원주방향으로 여자자계를 발생시키는 방법으로, 자성체코어가 여자전류를 직접 자성체에 통전시키는 방법을 사용할 수 있고, 또 자성체코어를 튜브형으로 제작하여서 자성

체코어의 길이방향으로 여자코일을 설치할 수도 있다.

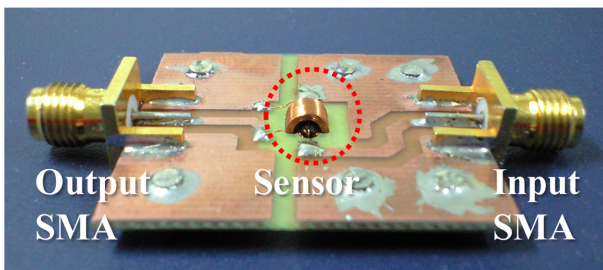
최근에는 센서의 소형화가 센서의 응용면에서 중요한 이슈가 되면서, 직교형 플럭스게이트 센서가 새롭게 주목을 받고 있다[5-8]. 그 이유는 평행형 플럭스게이트 센서를 이용하여서 자계를 검출하기 위해서는 자성코어를 여자(Excitation)시키는 여자코일(Excitation coil)과 외부 자계에 비례하는 기전력(Electromotive force)을 발생시키는 검출코일(Pickup coil)을 이용할 필요가 있으나, 아몰퍼스 와이어와 같이 도전성을 가지는 자성코어를 이용하는 직교형 플럭스게이트 센서의 경우에는 자성코어에 직접 통전함으로써 여자가 가능하기 때문에, 평행형 플럭스게이트 센서에 비해서 구조가 비교적 간단해지므로 소형화에 유리하기 때문이다[5-10]. 그러나, 직경이 $\sim 100 \mu\text{m}$ 에 불과한 아몰퍼스 와이어를 정확하게 정렬시켜서 회로기판에 실장하는 것은 쉽지가 않다. 센서의 정렬이 외부 자계에 대한 출력의 감도 및 정확도에 직접 영향을 미치기 때문에 아몰퍼스 와이어를 센서의 자성체 코어로 사용하는 경우에 이러한 점은 문제가 될 수 있다[11].

본 연구에서는 소형의 직교형 플럭스게이트 센서를 개발하기 위해서 소형의 원통형 페라이트 코어를 이용한 센서를 제작하고, 그 특성에 대해서 조사하였다. 특히, 본 논문에서는 원통형 페라이트 코어를 이용한 직교형 플럭스게이트 센서의 감도를 높이기 위해서, 수백 kHz 대역에서 사용할 때의 최적 구동주파수를 설정하는 것에 대하여 검토하였다.

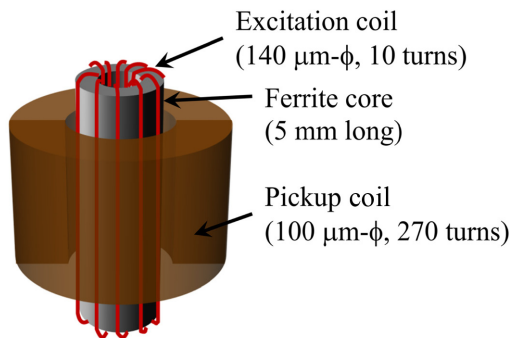
II. 실험방법

Fig. 1(a)는 제작한 직교형 플럭스게이트 센서를 나타내며, Fig. 1(b)는 센서소자를 개략적으로 표현한 것이다. 센서를 구성하는 자성체 코어로서 TDK사의 NiZn계 페라이트[12]를 사용하였다. 페라이트 코어는 Fig. 1(b)에서 표현하고 있는 것과 같이 원통형구조를 가지고 있으며 길이 5 mm, 내경과 외경은 각각 0.8 mm, 1.6 mm 였으며, 상대 초투자율은 1500이었다. 페라이트 코어에 Fig. 1(b)에서 표현하고 있는 것과 같이 에나멜로 절연된 구리선(140 μm - ϕ)을 10회 감아서 여자코일을 구성하였다. 검출코일로는 구리선(100 μm - ϕ)을 보빈레스 권선기로 제작한 코일을 이용하였다. 솔레노이드 형상의 검출코일의 권선수는 270턴이었으며, 솔레노이드 길이는 3.4 mm 였으며, 내경과 외경은 각각 2.5 mm와 3.4 mm 였다. 제작한 센서소자는 Fig. 1(a)에서 나타낸 것과 같이, PCB상에 실장하였으며, 입력과 출력의 그라운드드는 서로 분리된 형태를 가지도록 하였다. 입력과 출력신호는 SMA 커넥터를 이용하여서 외부로 연결될 수 있도록 하였다. 입력과 출력신호를 각각 고주파 증폭기와 디지털 오실로스코프에 연결하기 위해서 길이 0.5, 1, 3, 5 m의 동축케이블을 이용하였다. 사용한 동축케이블의 특성임피던스는 50 Ω 이었다.

제작한 센서의 출력특성은 Fig. 2에서 나타낸 것과 같은 측정 셋업을 이용하여서 측정하였다. 제작한 센서에 외부자계를 인가하기 위해서 내경 15 cm, 외경 25 cm의 두개의 원형



(a)



(b)

Fig. 1. (Color online) Photograph of the fabricated orthogonal fluxgate sensor (a) and schematic view of the sensor element (b).

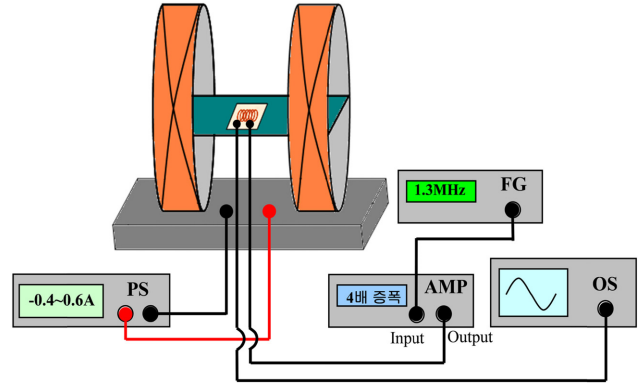


Fig. 2. (Color online) Measurement setup for detecting sensor output.

코일을 이용하였고, 두개의 원형 코일을 구성하는 두 코일의 간격은 15 cm 였다. 센서의 여자전류는 신호발생기에서 발생한 정현파 신호를 고주파 증폭기를 통해서 센서의 여자코일에 공급되었다. 이 때, 센서의 안정한 기본파(fundamental mode) 출력이 가능하도록 하기 위해서[7, 8], DC 바이어스를 교류여자전류에 합쳐서 인가하였다. 센서의 출력신호는 디지털 오실로스코프를 이용하여서 검출하였다.

III. 실험결과

Fig. 3은 구동주파수에 따르는 출력전압을 나타낸 것으로, 센서의 검출코일과 계측기(디지털 오실로스코프)를 연결하기 위한 길이 0.5, 1, 3, 5 m의 동축케이블을 이용하였을 때의 결과를 나타내었다. 이 때, 센서에 인가한 외부자계는 10 Oe 였으며, 센서를 구동하기 위한 교류 전류와 바이어스 전류는

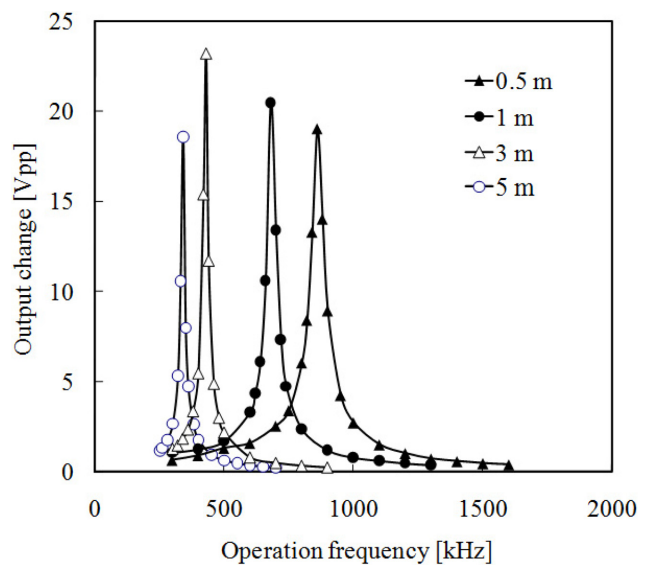


Fig. 3. (Color online) Operation frequency dependence of output voltage, coaxial cable length : 0.5, 1, 3, 5 m.

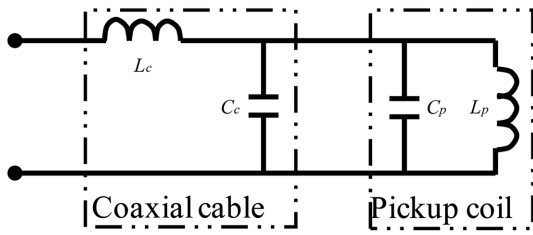


Fig. 4. Equivalent circuit of pickup coil and coaxial cable.

각각 18.6 mA와 100 mA였다. 이 결과로부터 알 수 있듯이, 센서의 출력전압은 주파수에 크게 의존한다. 센서의 출력전압이 구동주파수에 의존하는 현상은 자성코어를 포함한 검출코일과 동축케이블의 LC공진현상으로 설명할 수 있다[10, 13]. 계측기의 입력임피던스가 충분히 크기 때문에(일반적으로 $\approx 1\text{ M}\Omega$), 검출코일과 동축케이블의 LC공진주파수에서 임피던스는 최대가 되며, 이 때 계측기의 임피던스와 검출코일(동축케이블을 포함한)의 임피던스의 크기가 가장 비슷하게 되기 때문에 최대의 출력전압이 얻어진다.

동축케이블의 길이에 따라 출력전압이 달라지는 현상도 센서의 신호를 검출하기 위한 검출코일과, 검출코일과 측정기를 연결하기 위한 동축케이블의 임피던스의 주파수특성으로 설명할 수 있다. 검출코일과 동축케이블의 저항을 무시하면 계측기에서 본 센서의 출력 측은 Fig. 4와 같은 등가회로로 고려할 수 있다.

실제로 1 MHz에서 검출코일의 저항은 $10\ \Omega$ 정도로 검출코일의 리액턴스와 비교하면 충분히 작아서 무시할 수 있음을 알 수 있었다. 동축케이블의 인덕턴스 L_c 와 캐패시턴스 C_c 는 동축케이블의 특성임피던스와 동축케이블의 단면 형상으로부터 계산할 수 있으며, 각각 $2.5 \times 10^{-7}\text{ H}$ 와 $1 \times 10^{-10}\text{ F}$ 이었다. 그리고, 검출코일의 인덕턴스 L_p 와 캐패시턴스 C_p 는 측정된 검출코일의 측정된 임피던스로부터 계산될 수 있다. 즉, 앞에서 기술한 바와 같이 검출코일의 저항을 무시하면, 충분히 낮은 주파수에서는 코일을 구성하는 구리선 사이에서 발생하는 누설 전계에 의한 캐패시턴스의 영향을 무시할 수 있으므로 임피던스는 $Z \approx j\omega L_p$ 고려할 수 있다. 따라서, 측정된 임피던스와 구동주파수로부터 인덕턴스 $L_p \approx Z/j\omega$ 를 구해낼 수 있다 [13]. 그리고, 검출코일의 캐패시턴스 C_p 는 검출코일을 구성하는 구리선들 사이에서 발생하는 누설 전계(Stray electric field)의 영향을 무시할 수 없는 주파수, 예를 들어, LC공진주파수 근처에서 측정된 임피던스 $Z = j\omega L_p + 1/j\omega C_p$ 와 상기 방법으로 구한, 즉 충분히 낮은 주파수에서 구한 인덕턴스를 이용하여서 구할 수 있다. 이러한 방법으로 구한 검출코일의 인덕턴스와 캐패시턴스는 각각 $4.15 \times 10^{-4}\text{ H}$ 와 $1.5 \times 10^{-11}\text{ F}$ 였다.

Fig. 5는 최적 주파수(출력 전압이 최대가 나타나는 주파수)

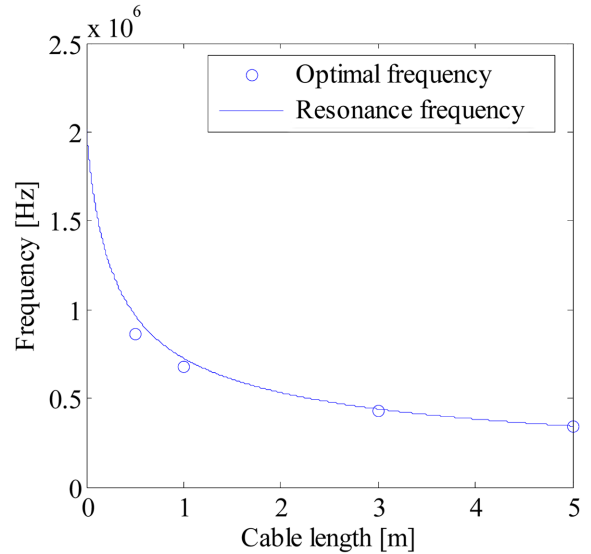


Fig. 5. (Color online) Cable length dependences of optimal frequency and LC resonance frequency.

와 검출코일과 동축케이블의 LC공진주파수를 함께 나타낸 것이다. 여기서, LC공진주파수는 식(1)에 의해서 구해졌다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i C_i}} \quad (1)$$

여기서, L_i 와 C_i 는 동축케이블과 검출코일의 인덕턴스와 캐패시턴스를 합한 값으로서, 각각, $L_i = L_p + L_c$, $C_i = C_p + C_c$ 로 나타낼 수 있다.

Fig. 5의 결과로부터 알 수 있듯이, 최적 주파수와 LC공진주파수는 잘 일치하고 있다고 볼 수 있으며, 이 결과로부터 센서의 검출코일과 신호연결을 위한 케이블의 특성 및 길이가 결정되었을 때, 최적의 구동 주파수를 결정하기 위해서 검출코일과 케이블의 인덕턴스와 캐패시턴스를 분석하는 방법은 유용하다고 할 수 있다.

Fig. 6는 DC바이어스 전류를 215 mA로 하였을 때, 출력전압의 주파수 의존성을 나타낸 것으로, 교류 구동 전류를 각각 82, 164, 246, 328, 410 mA로 하였을 때의 결과를 함께 나타낸 것이다. 이 때, 출력전압은 1 Oe의 외부자계를 인가하면서 측정하였고, 센서의 검출코일과 계측기를 연결하기 위해서 사용한 케이블의 길이는 1 m였다.

Fig. 6의 결과로부터, 최적 주파수(임의의 자계에 대해서 출력 전압이 최대가 되는 주파수)는 여자전류와는 크게 상관없다는 것을 알 수 있다. 여자전류와 최대 출력 전압을 정리하여 보면, 82 mA일 때 3.2 V, 164 mA일 때 5.9 V, 246 mA일 때 7.6 V, 328 mA일 때 9 V, 그리고 410 mA일 때 12.8 V였다. 이 결과로부터 여자전류가 커짐에 따라 출력 전압이 증가하지만 선형적으로 비례하지는 않는다는 것을 알 수 있다.

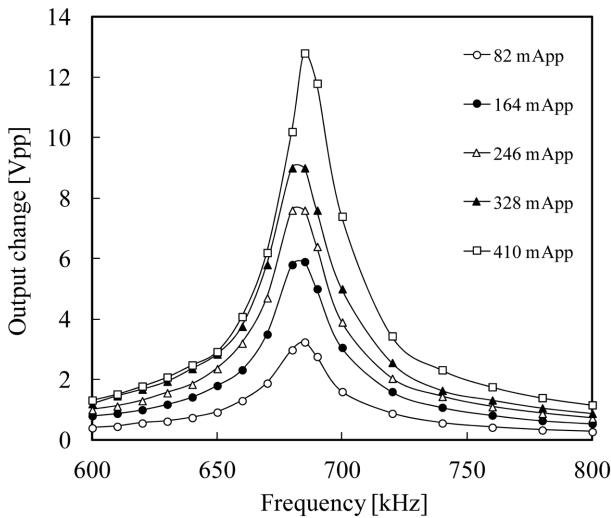


Fig. 6. Frequency dependence of output voltage.

최적 주파수에서 출력 전압이 여자전류의 크기에 따라 선형적으로 증가하지 않는 것에 대해서는 아직까지 실험적으로 검토하지는 못하였으나, 여자전류가 증가함에 따라 측정 중 열이 발생하기 때문이 아닐까 짐작된다. 실제로 실험 중, 여자전류를 500 mA 이상으로 하였을 때에는 센서소자(여자코일)의 자체 발열로 측정을 지속할 수 없었다.

IV. 결 론

페라이트 코어를 이용하여 제작한 직교형 플럭스게이트 센서에 있어서 구동주파수가 센서의 출력특성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 센서의 출력전압은 구동주파수를 변화시키며 따라 크게 변화함을 알 수 있었으며, 센서의 검출코일과 동축케이블의 LC공진주파수 근처에서 최대의 출력전압을

얻을 수 있었다. 이는 센서를 구성하는 출력단(검출코일과 케이블)의 임피던스가 LC공진주파수에서 최대가 되며, 계측기의 입력임피던스에 근접하기 때문으로 파악되었다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] F. Primdahl, IEEE Trans. Magn. **6**, 276 (1970).
- [2] Juan Carlos Cruz, Hector Trujillo, and Mairte Rivero, Sensors and Actuators A **71**, 167 (1998).
- [3] Pavel Ripka, J. Magn. Mater. **320**, 2466 (2008).
- [4] Zu-Cheng Gao and R. Doncaster Russel, IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing **25**, 124 (1987).
- [5] X. P. Li, J. Fan, J. Ding, H. Chiriach, X. B. Qian, and J. B. Yi, J. Appl. Physics **99**, 08B313 (2006).
- [6] Xinbo Qian, Xiaoping Li, Yong Ping Xu and Jie Fan, IEEE Trans. Magn. **41**, 3715 (2005).
- [7] Ichiro Sasada, IEEE Trans. Magn. **38**, 3377 (2002).
- [8] I. Sasada, J. Appl. Phys. **91**, 7789 (2002).
- [9] 신광호, 한국자기학회지 **19**, 17 (2009).
- [10] S.-H. Choi, Y.-H. Kim, B. Yoon, C.-S. Yang, and K.-H. Shin, IEEE Trans. Magn. **47**, 2573 (2011).
- [11] J. Vcelák and J. Kubík, Sensors and Actuators A **155**, 233 (2009).
- [12] <http://www.tdk.co.jp/>.
- [13] Y. Kim, Y.-H. Kim, C.-S. Yang, and K.-H. Shin, J. Magnetics accepted.

Operation Frequency Dependence of Output of Orthogonal Fluxgate Sensor Fabricated with Ferrite Core

Kwang-Ho Shin*

Department of Information & Communication Engineering, Kyungshung University, 110-1 Daeyeon-dong, Nam-gu, Pusan 608-736 Korea

(Received 19 November 2012, Received in final form 10 December 2012, Accepted 10 December 2012)

In this study, we have investigated that the operation frequency dependences of the output properties of the orthogonal fluxgate sensor which was fabricated with a ferrite core. An orthogonal fluxgate sensor should be operated in as high as possible frequency to enhance its sensitivity in the case of small sized sensor, because sensitivity of the sensor is proportional to cross section area, winding number and operation frequency. In this study, we investigated the correspondence of the frequency dependence of output and the reactance (inductance and capacitance) of pickup coil and cable. Experimental results represented that we could obtain maximum output (= sensitivity) at optimal frequency which is near LC resonance frequency of the pickup coil and cable.

Keywords : orthogonal fluxgate, ferrite core, operation frequency, LC resonance