

## 아몰퍼스와이어를 이용하여 제작한 직교 플럭스게이트 센서의 출력에 미치는 구동 주파수와 여자 전류의 영향

신광호\*

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

(2009년 2월 2일 받음, 2009년 2월 16일 최종수정본 받음, 2009년 2월 16일 게재확정)

코발트계 아몰퍼스와이어와 검출코일을 이용하여서 제작한 직교 플럭스게이트 센서에 있어서 구동주파수와 입력전류가 센서의 출력특성에 미치는 영향을 조사하였다. 구동전류가 0.3 A까지 증가함에 따라서 센서의 출력전압은 증가하는 경향을 나타내었으나, 그 이상의 구동전류에 대하여서는 출력전압의 증가율이 둔감하게 되었고 0.6 A 이상의 구동전류에 대하여서는 출력전압이 감소하는 경향을 나타내었다. 센서의 구동주파수를 1.3 MHz까지 높임으로써 출력전압을 높일 수 있었으나, 그 이상의 구동주파수에서는 출력전압이 감소하는 것을 알 수 있었다. 1.3 MHz의 구동주파수에 대하여 출력전압은 3.8 V였으며, 1 MHz의 구동주파수에 대하여서는 1.32 V였다.

**주제어** : 직교플럭스게이트, CoFeSiB 아몰퍼스와이어, 고감도 자기센서

### I. 서 론

상온에서 동작하는 고감도 자기 센서 중 하나인 직교 플럭스게이트(orthogonal fluxgate) 센서[1, 2]는 비교적 구조가 간단하면서도 높은 자기 검출 감도와 우수한 자기 분해능을 가진다. 일반적으로 직교형 플럭스게이트 센서는 강자성체로 이루어진 와이어나 튜브, 막대와 강자성체 주위를 둘러싸고 있는 신호검출코일로 구성된다. 강자성체에 교류전류가 통전되면 강자성체의 원주방향으로 여자자기(excitation magnetic field)가 형성되며 외부자계가 없을 때에는 검출코일과 같은 방향의 자속(magnetic flux)변화가 형성되지 않으므로 출력신호가 발생하지 않는다. 그러나 센서의 길이 방향으로 외부자계가 인가되면 자성체의 자화(magnetization)이 외부자계방향으로, 외부자계의 크기에 비례하여서 기울어지게 되므로 교류의 여자자계에 의해서 자성체의 자화가 진동하고, 이 자화의 진동에 의해서 검출코일에 출력신호가 발생하게 된다. 이러한 구동원리에 의해서 직교 플럭스게이트 센서는 일반적인 플럭스게이트 센서에 비하여 여자 코일이 필요하지 않기 때문에 단순한 구조를 가질 수 있으며 연자성체의 자화와 검출 코일의 권선수에 직접 비례하는 높은 감도를 나타낼 수 있다. 더욱이 일반적인 플럭스게이트 센서의 경우 제2고조파를 검출하는 것이 일반적이지만, 최근 큐슈대학의 Sasada교수는 단극 구동(unipolar excitation)을 통해서 직교 플럭스게이트센서를 기본과 구동으로 높은

감도와 분해능을 나타내게 할 수 있다는 연구결과를 보고하였다[2, 4]. 이 연구결과는 센서코어의 여자전류에 직류의 바이어스를 인가함으로써 자벽(magnetic domain wall)이 형성되지 않도록 한 상황에서 여자를 하기 때문에 플럭스게이트 센서의 기본과 구동에서 흔히 발생할 수 있는 이력현상(hysteresis)를 방지하는 것이다. 직교 플럭스게이트센서를 기본과로 구동할 수 있도록 한 연구결과는 신호처리회로를 단순하게 함으로써 노이즈에 대해 강인하면서 소형화에 더욱 적합한 자기센서의 구동 메카니즘을 제공한다고 할 수 있다. 그러나 보다 높은 감도를 얻기 위해서는 출력신호에 직접적으로 영향을 미치는 센서의 구동주파수와 입력전류의 영향을 검토할 필요가 있다. 직교 플럭스게이트 센서의 출력은 패러데이 법칙(Faraday's law)에 의한 유기 기전력을 검출하는 것이므로, 비교적 낮은 주파수영역에서는 구동주파수에 직접 비례하지만 구동주파수가 높아져서 와전류손실을 무시할 수 없게 되면 실효적인 자속밀도(effective magnetic flux density)가 낮아지게 되므로 출력신호는 더 이상 주파수에 비례하지 않을 것으로 예상된다. 직교 플럭스게이트 센서에 있어서 센서의 원주방향으로 발생하는 여자자기(excitation magnetic field)는 입력전류에 비례하기 때문에 출력신호 또한 입력전류에 의존할 것으로 예상되지만 주파수가 높아져서 와전류 손실을 무시할 수 없는 경우에는 출력신호가 감소할 수도 있다.

본 연구에서는 코발트계 아몰퍼스와이어와 검출코일을 이용하여서 제작한 직교 플럭스게이트 센서에 있어서, 구동주파수와 입력전류가 감도에 미치는 영향을 조사하였다.

\*Tel: (051) 607-5152, E-mail: khshin@star.ks.ac.kr

## II. 실험 방법

직교 플럭스게이트 센서를 구성하기 위해서, 자성체 코어로서 직경 80  $\mu\text{m}$ , 길이 10 mm의 코발트계 아몰퍼스와이어 (CoFeSiB, Unitika Co.[5])를 이용하였고 5  $\mu\text{m}$ 의 에나멜이 코팅된 직경 100  $\mu\text{m}$ 의 구리선을 280턴 감은 솔레노이드형 검출코일을 이용하였다. 아몰퍼스와이어는 연자성을 향상시키기 위해서 280  $^{\circ}\text{C}$ 에서 1시간 동안 진공 열처리하였다. 솔레노이드코일의 길이는 3.2 mm였고, 외경은 4.2 mm, 내경은 2.5 mm였다. Fig. 1(a)는 본 연구에서 제작한 직교 플럭스게이트 센서의 개략도를 나타낸 것이고, Fig. 1(b)는 제작한 센서의 사진을 나타낸 것이다. 아몰퍼스와이어는, Fig. 1에서 나타낸 것처럼, 솔레노이드형 검출코일의 내부에 설치되었으며, 아몰퍼스와이어의 길이방향으로 검출하고자 하는 외부자계가 인가되도록 하였다. 아몰퍼스와이어의 원주방향으로 여자자계를 형성하기 위해서 아몰퍼스와이어에 교류전류를 직접 통전

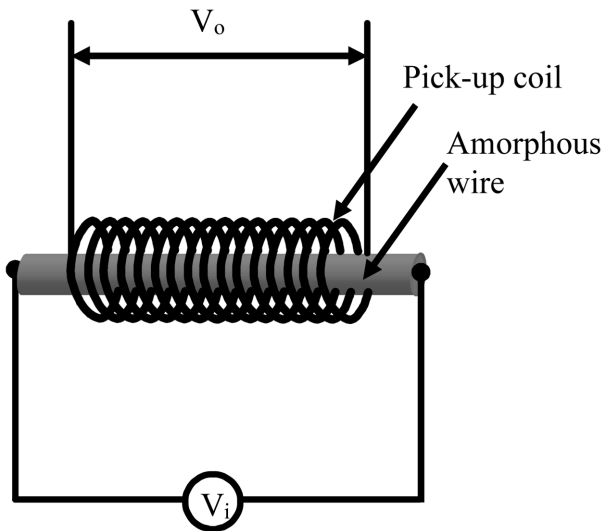
하였다. 이 때, 교류전류의 크기는 0.1 A~1 A로 가변하면서 센서의 출력을 측정하였고, 주파수는 0.1 MHz~2 MHz로 가변하면서 측정하였다. 제작한 센서의 출력특성을 측정은 헬름홀츠 코일을 이용하여서 외부자계를 인가하면서 실시하였고, 센서구동을 위한 전류는 신호발생기에서 발생된 신호를 고주파증폭기를 통해서 인가하였다. 센서의 출력은 디지털 오실로스코프를 이용하여 확인하였다. 이 때, 250 mA의 바이어스 전류를 가한 상태에서 기본파를 측정하였다. 검출코일의 임피던스의 주파수특성은 네트워크 어널라이저를 이용해서 300 kHz~20 MHz의 주파수영역에서 측정하였다.

## III. 결과 및 고찰

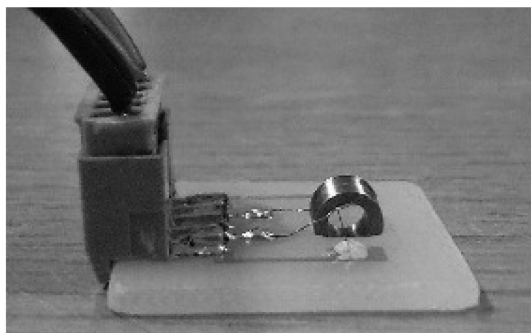
직교 플럭스게이트 센서의 출력전압은 식(1)에서 나타낸 것과 같이 검출코일의 권선수  $N_s$ , 자성체코어의 단면적  $A_s$ 에 비례한다[1].

$$V_o = -N_s A_s \frac{1}{(1 + N\mu)^2} \frac{d\mu}{dB dt} \quad (1)$$

따라서 높은 출력감도를 얻기 위해서는 코어의 단면적과 검출코일의 권선수를 크게 해야 하지만, 이는 센서를 소형화를 용이하지 않게 한다. 또한 본 연구에서 검토하고 있는 직교 플럭스게이트 센서와 같이 자성체코어에 직접 통전하는 경우, 자성체코어의 도전성이 확보되어야 하기 때문에, 즉 금속자성체라야 하기 때문에, 코어의 단면적이 커지면 와전류손실에



(a)



(b)

Fig. 1. Schematic view and photograph of the fabricated orthogonal fluxgate sensor.

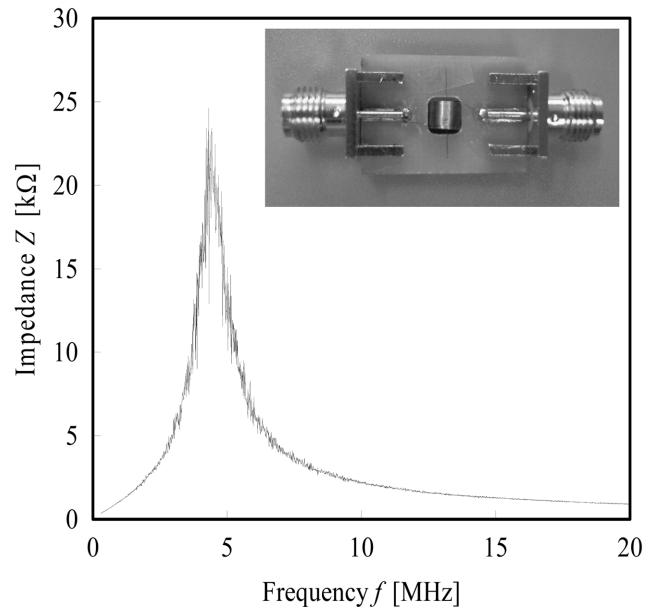


Fig. 2. Frequency dependency of impedance of pick-up coil. The photograph inserted in the graph is representative of the measurement setup for this result.

의해서 구동주파수를 높이는 것에 제한이 된다. 또, 검출코일의 권선수가 많아지면 LC공진에 의해서 구동주파수를 높일 수 없다. 그럼에도 불구하고 센서의 감도를 높이기 위해서는 식(1)에서 알 수 있는 것과 같이 구동주파수를 높이는 것이 매우 중요하다[4, 6]. 따라서, 센서의 크기 및 구조가 결정되면 높은 출력감도를 얻을 수 있는 구동주파수를 결정하는 것이 필요하다. 이는 센서를 전기적인 등가회로로 해석하여 결정할 수도 있고 실험적으로 결정할 수도 있다. 본 연구에서는 실험적인 방법으로 센서의 출력감도를 높이기 위한 구동주파수를 결정하였다. Fig. 2는 이몰퍼스 와이어를 장착한 상태에서 측정된 검출코일의 임피던스의 주파수특성을 나타낸 것이다. 그래프내부에 삽입된 사진은 이 결과를 측정하기 위해서 검출코일을 SMA커넥터에 연결한 모습을 나타낸 것이다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이, 검출코일의 임피던스는 주파수가 증가함에 따라 약 2 MHz까지는 주파수에 선형적으로 비례하여 증가하고 있고 2 MHz 근처에서 변곡점을 가지면서 급격하게 증가한다. 임피던스가 약 4.5 MHz에서 최고치를 가지는 것은 검출코일의 인덕턴스  $L$ 과 선간 누설전계에 의해서 발생하는 캐패시턴스  $C$ 에 의해서 발생하는 LC공진에 의한 것이다. 검출코일의 임피던스가 극단적으로 높아지는 경우 출력신호가 저감되기 때문에, 본 실험에서 사용한 검출코일의 경우, 구동주파수를 4.5 MHz 이하로 설정할 필요가 있다는 것을 이 결과로부터 알 수 있다. Fig. 3은 제작한 센서 출력전압의 구동전류 의존성을 나타낸 것이다. 이 때, 센서의 구동주파수는 1 MHz였으며 0.25 A의 직류바이어스전류와 함께 구동전류를 인가하였으며, 출력신호는 기본파를 측정하였다. 직

류의 바이어스전류를 인가한 것은 직교 플렉스게이트 센서를 구동하여 기본파를 검출할 때 발생할 수 있는 출력신호의 비선형성을 없애기 위한 것이다[3]. 센서의 출력특성은 1 Oe의 외부자계를 인가하면서 측정하였다.

Fig. 3의 결과에서 알 수 있듯이, 구동전류가 0.3 A일 때까지는 센서의 출력은 구동전류에 선형적으로 비례하여 증가한다. 이는 구동전류가 증가함에 따라 이몰퍼스 와이어의 원주방향으로 발생하는 여자자계가 증가하게 되고 이는 식(1)에서 나타낸 지속밀도  $B$ 를 커지게 하기 때문이다. 즉 지속 밀도가 커지게 되면 지속 밀도의 시간적인 변화분  $dB/dt$ 이 증가하게 되어서 센서의 출력이 커지게 되는 것이다. 그러나 0.3 A 이상 구동전류가 커지면 센서의 출력증가율이 저감되고 0.65 A 이상에서는 구동전류가 커짐에 따라 센서의 출력이 감소한다. 0.3 A 이상의 구동전류에 센서의 출력증가율이 둔감하게 되는 것은 이몰퍼스 와이어에서 줄열(Joule's heat)이 발생하기 때문으로 예상된다. 이몰퍼스 와이어의 내부로부터 열이 발생하면 이몰퍼스 와이어의 지속 밀도  $B$ 를 작아지게 할 것이다. 센서를 구성하는 이몰퍼스 와이어의 1 MHz에서의 저항은  $\sim 3.9 \Omega$  이었다. 따라서, 실지로 0.5 A의 구동전류를 인가한 경우, 단위시간당  $\sim 1.2 \text{ W} (\approx I^2 R, I = I_{DC} + I_{AC})$  정도의 전력이 열로 소모된 것을 알 수 있다. 이몰퍼스 와이어가 설치된 환경에서의 정확한 열분산 계수(heat dispersion coefficient)[7]를 알 수 없기 때문에 어느 정도 온도가 상승하였는지 예측하기는 용이하지 않지만, 이몰퍼스 와이어의 단면적을 고려하여 볼 때 자기적인 특성이 변화할 수 있는 정도의 열이 발생할 수 있다는 것은 충분히 예상할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제작

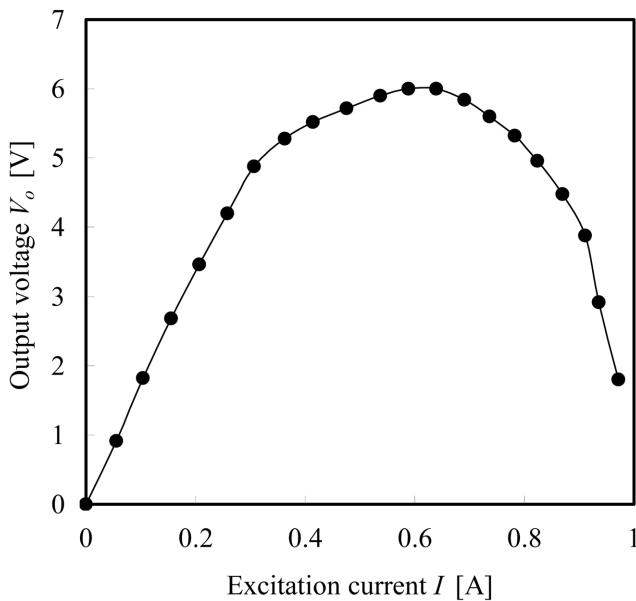


Fig. 3. Excitation current dependence of output voltage of the fabricated sensor.

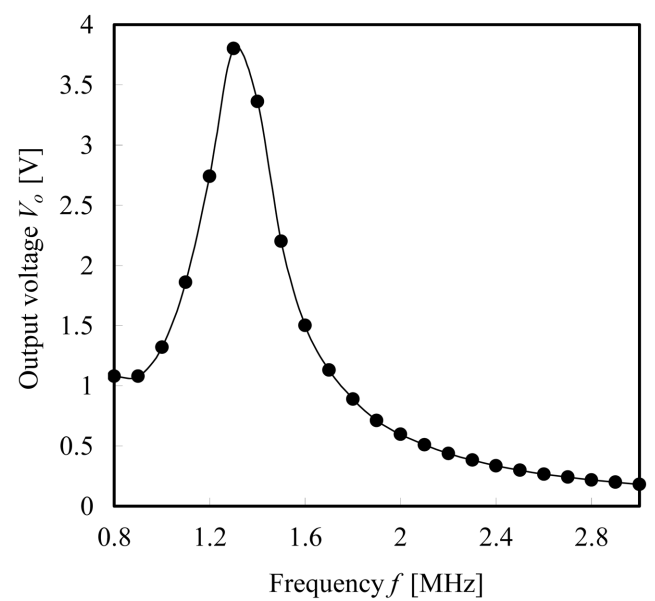


Fig. 4. Operation frequency dependence of output voltage of the fabricated sensor.

한 직교 플럭스게이트 센서의 경우, 구동전류는 0.3 A 이하로 하는 것이 바람직하다.

Fig. 4는 구동주파수에 대한 센서의 출력특성을 나타낸 것이다. 이 때, 센서의 구동전류는 교류성분이 0.2 A, 직류 바이어스성분이 0.25 A가 되도록 하였다. 또 출력특성은 1 Oe의 외부자계를 인가하면서 측정하였다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 센서의 출력은 구동주파수가 1.3 MHz까지 증가함에 따라 증가하지만, 그보다 높아지면 감소하는 특성을 나타낸다. 아몰퍼스와이어의 투자율이 구동주파수에 의존하지 않는다는 가정하에 식(1)로부터 예측할 수 있는 결과는 구동주파수가 증가함에 따라 출력신호가 1차 함수적인 증가를 나타내는 것이다. 그러나 측정된 결과를 보면 센서의 출력특성에서 공진 현상과 유사하게 주파수에 따라 증가/감소하는 것을 확인할 수 있다. 현재 이 결과에 대한 엄밀한 설명을 할 수는 없지만 주어진 외부자계와 여자자계일 때, ~1.3 MHz에서 아몰퍼스와의 투자율이 증가하였기 때문인 것으로 예측하고 있다. 즉  $d\mu/dB$ 가 커져서 출력신호가 커진 것으로 예상된다. 서로 직교하는 여자자계와 외부자계에 의해서 자성체의 실효 이방성이 충분히 변화될 수 있기 때문에 임의의 주파수에서 자성체의  $d\mu/dB$ 은 충분히 크게 변화할 수 있다. 이 결과에 대하여서는 자기동역학적인 엄밀한 해석이 요구되며, 현재 정량적인 분석을 실시하고 있다. Fig. 4에서의 결과에서, 직교 플럭스게이트 센서에 있어서 구동주파수의 엄밀한 설정이 매우 중요하다라는 것을 강조할 수 있다. 예를 들어, 구동주파수가 1 MHz일 때 출력전압은 1.32 V였으나 1.3 MHz일 때 출력전압은 3.8 V였다. 다른 조건이 동일한 경우, 센서의 출력전압은 센서의 감도에 직접 비례한다.

#### IV. 결 론

아몰퍼스와의이어를 이용한 직교 플럭스게이트 센서에 있어

서 구동전류와 구동주파수가 센서의 출력특성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 구동전류가 증가함에 따라서 센서의 출력전압은 증가하는 경향을 나타내었으나, 일정이상의 구동전류에 대하여서는 출력 전압의 증가율이 둔감하게 되거나 혹은 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 센서를 구성하고 있는 아몰퍼스와의이어에서 발생한 줄열에 의해서 자기적인 특성이 열화되기 때문인 것으로 판단된다. 센서의 구동주파수를 높임으로써 출력전압을 높일 수 있었으나, 일정이상의 구동주파수에서는 출력전압이 감소하는 것을 알 수 있었다. 센서의 출력전압이 주파수에 대하여 1차 함수적인 증가를 나타내지 않는 것은 아몰퍼스와의이어의 투자율이 외부자계와 여자자계에 의존하는 실효이방성에 의해서 변화할 수 있기 때문인 것으로 예측되었다. 이를 정량적으로 분석하기 위한 자기동역학적인 계산이 요구된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2008학년도 경성대학교 학술연구비 지원에 의해서 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] F. Primdahl, IEEE Trans. Magn., **MAG-6**, 376 (1970).
- [2] I. Sasada, J. Appl. Phys., **91**, 7789 (2002).
- [3] I. Sasada, IEEE Trans. Magn., **38**, 3377 (2002).
- [4] E. Paperno, Sensors and Actuators A, **116**, 405 (2004).
- [5] <http://www.unitika.co.jp/>
- [6] X. P. Li, J. Fan, J. Ding, H. Chiriac, X. B. Qian, and J. B. Yi, J. Appl. Phys., **99**, 08B313 (2006).
- [7] I. Kirschner, Sensors and Actuators A, **42**(1-3), 622 (1994).

## **Influences of Operation Frequency and Excitation Current on Output Signal of Orthogonal Fluxgate Sensor Fabricated with an Amorphous Wire**

**Kwang-Ho Shin\***

*Department of Multimedia Communication Engineering Kyungsung University, Pusan 608-736, Korea*

(Received 2 February 2009, Received in final form 16 February 2009, Accepted 16 February 2009)

In this study, we have investigated that the excitation current and operation frequency dependences of the output properties of the orthogonal fluxgate sensor which was fabricated with a Co base amorphous wire and a pick-up coil. The output signal increased linearly with increase of the excitation current below 0.3 A, and decreased with increase of the excitation current over 0.6 A. It was also found that the output increased sensitively with increase of operation frequency below 1.3 MHz. The output was 3.8 V at the frequency of 1.3 MHz while 1.32 V at 1 MHz.

**Keywords** : orthogonal fluxgate, CoFeSiB amorphous wire, highly sensitive magnetic field sensor