

논문 2003-12-2-03

**PCB 다층 적층기술을 이용한 마이크로 플럭스게이트 자기 센서**

최원열\*, 황준식\*\*, 최상언\*\*

**Micro fluxgate magnetic sensor using multi layer PCB process**

Won-Youl Choi\*, Jun-Sik Hwang\*\*, and Sang-On Choi\*\*

**요 약**

본 논문은 마이크로 플럭스게이트 자기 센서 (micro fluxgate magnetic sensor)의 여자코일 선폭에 따른 자계 검출 특성 변화에 관한 것이다. 센서 제작을 위해 PCB 다층 적층기술을 사용하였으며, 연자성 코어를 둘러싼 여자코일 선폭을 각각 260  $\mu\text{m}$ 와 520  $\mu\text{m}$ 로 센서를 구현하였다. 센서는 모두 5층의 기판을 적층 하였으며, 가운데 (3번째)기판을 자성체 코어로, 자성체 코어 외부 (2번째와 4번째)기판을 여자코일로, 최외부 (1번째와 5번째)기판을 검출코일로 제작하였다. 연자성 코어로는 약 100,000의 큰 DC 투자율 (permeability)을 갖는 코발트 (Co)가 주성분인 아몰퍼스 재료를 사용하였으며, 자속 누설을 최소화하기 위해 사각 링 형태를 유지하였다. 솔레노이드 형태의 여자코일과 검출코일은 구리 재질로 제작되었다. 260  $\mu\text{m}$  여자코일 선폭을 갖는 자기센서는 여자조건이 360 kHz, 3  $V_{p-p}$ 의 정현파일 경우에 780 V/T로 매우 우수한 감도를 보이고 있으며, -100  $\mu\text{T}$  ~ +100  $\mu\text{T}$  영역에서 매우 우수한 선형특성을 보이고 있다. 자기 센서의 크기는  $7.3 \times 5.7 \text{ mm}^2$ 이며, 소비전력은 약 8 mW이다. 이런 초소형 자기센서는 휴대용 네비게이션 시스템, telematics, VR 게임기 등 다양한 응용분야에 적용할 수 있다.

**Abstract**

To observe the effect of excitation coil pitch on the micro fluxgate magnetic sensor, two sensors are fabricated using multi layer board process and the pitch distance of excitation coil are 260  $\mu\text{m}$  and 520  $\mu\text{m}$ , respectively. The fluxgate sensor consists of five PCB stack layers including one layer of magnetic core and four layers of excitation and pick-up coils. The center layer as magnetic core is made of a Co-based amorphous magnetic ribbon with extremely high DC permeability of  $\sim 100,000$  and has a rectangular-ring shape to minimize the magnetic flux leakage. Four outer layers as excitation and pick-up coils have a planar solenoid structure and are made of copper foil. In case of the fluxgate sensor having the excitation coil pitch of 260  $\mu\text{m}$ , excellent linear response over the range of -100  $\mu\text{T}$  to +100  $\mu\text{T}$  is obtained with sensitivity of 780 V/T at excitation sine wave of 3 $V_{p-p}$  and 360 kHz. The chip size of the fabricated sensing element is  $7.3 \times 5.7 \text{ mm}^2$ . The very low power consumption of  $\sim 8 \text{ mW}$  is measured. This magnetic sensor is very useful for various applications such as: portable navigation systems, telematics, VR game and so on.

Key Words : micro, fluxgate, magnetic, sensor, pitch

\* 강릉대학교 금속재료공학과 (Dept. of Metal and Materials Engineering, Kangnung National University)

\*\* 삼성종합기술원 MEMS Lab.(MEMS Laboratory, Samsung Advanced Institute of Technology (SAIT))

&lt;접수일자 : 2002년 9월 30일&gt;

**1. 서 론**

플럭스게이트 자기 센서는 상온에서 사용할 수 있는 센서로서는 가장 고 감도 및 고 분해능의 특성을 가지고 있다. 또한  $10^{-11} \sim 10^{-4} \text{ T}$ 의 측정 영역에 있어서, 직류 및 저주파 교류 자계의 크기 및 방향을 검출할 수 있으며, 전류의 흐

름 및 자성체 재료에 의해 발생하는 자장의 변화량을 검출하는 소자이다. 플럭스게이트 자기 센서의 기본 구성은 고투자율 재료로부터 형성된 연자성 코어에 감겨져 있는 여자코일과 검출코일로 형성되어 있다. 기본 검출원리는 연자성 코어의 비선형 특성 즉 포화특성을 이용한다. 여자코일에 충분히 큰 교류전류를 공급하여 자계를 발생시키면, 코어 내부의 자속 밀도는 주기적으로 포화한다. 이때 외부 측정자계가 주어지면 코어 내부의 자속 밀도를 변화시키며, 검출 코일은 이 자속의 변화량을 측정함으로써 외부 자계의 세기를 알 수 있다.

플럭스게이트 자기 센서의 연구는 1935년 Thomas에 의해 처음으로 특허 등록이 이루어졌으며, 원리 및 소자 구성은 Primdahl 및 Ripka 등에 의해서 보고 되었다.<sup>(1-5)</sup> 최근에는 산업의 발달과 함께 가상현실 공간에서의 움직임 감지, HDTV의 지자기 보상 및 색변짐 보상의 산업용, 심자도 측정 및 환자 재활 기구등의 의료용, 항공기, 선박 및 차량의 위치인식 시스템과 교통량 검출용 소자로서 이용되고 있으며, 나아가 휴대용 내비게이션 및 ITS등의 다양한 분야에 응용성을 확대하고 있다. 특히 휴대용 내비게이션 시스템 응용을 위해서는 센서의 소형, 경량 및 저가격화가 필수적인 요건이다.

이런 소형, 경량 및 저가격의 플럭스게이트 자기 센서를 제작하려는 시도는 많이 이루어지고 있으며, 크게 두가지 제작 방법으로 구분할 수 있다. 첫째는 실리콘 집적회로 기술이 근간이 된 마이크로머시닝(micromachining)방법이며, 둘째는 PCB 다층 적층기술을 이용한 방법이다. 먼저 실리콘 마이크로머시닝 기술을 이용한 것으로는, 1990년대 초 Seitz에 의해서 자성박막 코어와 검출코일을 실리콘에 집적하여 미약자계 검출에 이용한 센서가 최초로 보고 되었으며, 플럭스게이트 자기 센서의 구성요소 모두를 집적한 마이크로 자기 센서가 Kawahito를 비롯한 여러 연구자들에 의해 보고된 것을 계기로 신호처리 회로까지 동일 칩 위에 집적시킨 연구가 최초로 Choi에 의해 보고 되는 등 상당한 진전이 이루어졌다.<sup>(6-10)</sup> 또한 PCB 다층 적층기술을 이용한 방법으로는 Dezuari 및 APlus Co.에 의해 보고 되고 있으며, 크기, 성능 및 가격 측면에서 많은 경쟁력을 가지고 있다.<sup>(11, 12)</sup>

본 논문에서는 PCB 다층 적층기술을 이용해

마이크로 플럭스게이트 자기 센서를 제작하였고, 현재까지 실측하여 보고된 바 없는 여자코일 선평 효과를 관찰하였으며, 상용화를 위한 방향을 제시하였다.

## 2. 설계 및 구조

플럭스게이트 자기 센서의 설계/제작에 있어서, 그림 1에 나타난 차동 여자형 플럭스게이트 자기 센서의 기본구조를 이용한다. 이 구조는 연자성체 코어, 여자코일 및 검출코일로 구성되어 있고, 외부자계가 없는 경우, 검출코일에 유도된 펄스전압의 파형은 기하학적으로 대칭성이 있다. 이 때문에 푸리에 변환에 의한 주파수 해석에서는 기수차 고조파 밖에 나타나지 않는다. 그러나 외부자계가 인가되면, 검출된 펄스전압은 기하학적인 대칭성을 잃기 때문에 기수차 고조파 성분에 더하여 우수차 고조파 성분이 나타나게 된다. 이 우수차 (제n차 (n=2, 4, 6,.....))의 고조파 성분 중에서도 제2고조파에서 최대의 파고치를 갖게 되며, 이런 제2고조파를 검출함으로써, 오프셋(offset)이 없는 자계 검출이 가능해진다. 제2고조파 (Second Harmonics) 검출방식에 의한 감도( $S_B$ )는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$S_B = 8NA\mu_{eff} f_{exc} \sin \left[ \frac{\pi H_s}{H_m} \right] \quad (1)$$

여기서,  $N$ 은 검출코일의 감은 횟수,  $A$ 는 연자성 코어의 단면적,  $\mu_{eff}$ 는 연자성 코어의 실효 투자율(effective permeability),  $f_{exc}$ 는 여자 주파수,  $H_s$ 는 연자성 코어의 포화 자장,  $H_m$ 는 최대 여자 자장을 의미한다. 이 식으로부터  $H_m = 2H_s$ 의 경우가 최대 감도를 보이는 조건임을 알 수 있다.

그림 2는 PCB 다층 적층기술을 이용하여 제작된 플럭스게이트 자기 센서의 설계 구조도이며, 기능상 총 5층으로 구성된다. 5층 중 가운데인 3번째 층에 연자성 코어의 구조를 형성하고, 그 외각으로 여자코일과 검출코일의 솔레노이드 코일 구조를 구현했다. 여자코일 선평 효과를 관찰하기 위해 260  $\mu\text{m}$ 과 520  $\mu\text{m}$ 의 선평을 갖는 센서를 각각 설계 제작하였다. 연자성 코어의 재료로는 약 100,000의 투자율을 갖는 아몰퍼스

(amorphous) 재료를 사용하였고, 사각 링(rectangular-ring)형태의 구조로 자속(magnetic flux)의 누설을 최소화 하였다. 여자코일과 검출코일의 재료로는 전기전도도가 좋은 구리(copper)를 사용하였다.

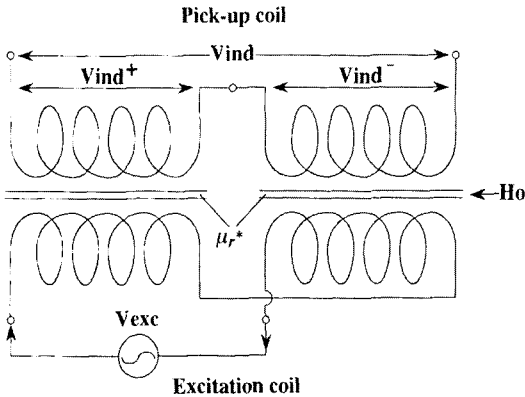


그림 1. 차동여자형 플럭스게이트 자기 센서의 기본구조.

Fig. 1. The basic configuration of the differential fluxgate magnetic sensor.

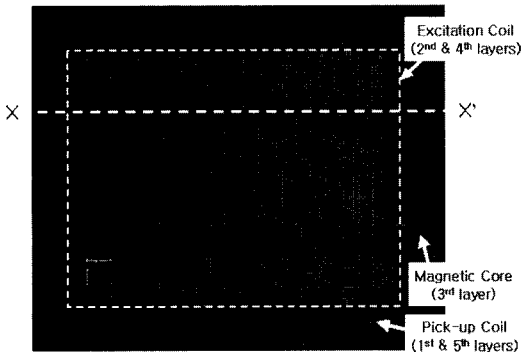


그림 2. PCB 다층 적층기술을 이용한 차동형 플럭스게이트 자기 센서의 설계 구조도.

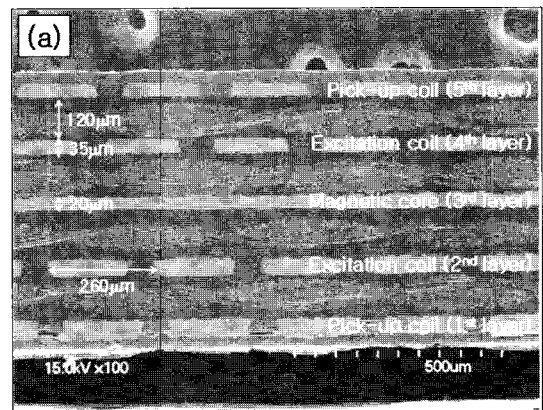
Fig. 2. New structure of the differential fluxgate magnetic sensor fabricated using printed circuit board (PCB) technology.

### 3. 실험

마이크로 플럭스게이트 자기 센서를 제작하기 위한 PCB 적층공정은 3번째 층인 연자성 코어의 형성에서 시작된다. 2번째 층인 구리 호일(foil)과 3번째 층인 20 μm 두께의 코발트(Co)가 주성분인 아몰퍼스 연자성체 리본을 에

폭시 보드 (epoxy board)와 함께 hot pressing을 이용하여 적층시킨다. 적층시 사용되는 에폭시 보드는 접합층 및 절연 층의 두 가지 역할을 한다. 적층된 연자성 코어를 사각 링 형태의 구조로 구현하기 위해 wet etching하고, 그 위에 다시 4번째 층인 구리 호일을 적층, 패터닝 (patterning)하고, 2번째 층과 드루 홀(through hole)로 통전시켜서 솔레노이드 형태의 여자코일을 형성한다. 드루 홀의 형성은 드릴링(drilling)으로 홀 (hole)을 만든 후에 동 도금(copper electroplating)으로 홀을 채워 통전시킨다. 그 후에 최외층으로 1번째와 5번째 층을 여자코일 형성시와 동일한 방법으로 적층, 패터닝, 드릴링, 동도금하여 검출코일을 형성한다. 최종적으로 pad를 형성한다.

그림 3은 새로운 PCB 다층 적층기술을 이용하여 제작된 260 μm과 520 μm의 선폭을 갖는 플럭스게이트 자기 센서에 대한 단면과 평면 전자현미경 (SEM) 사진이다. 그림 3(a)은 260 μm의 여자코일 선폭을 갖는 센서의 단면 사진으로 여자코일과 검출코일 모두 180 μm width와 80 μm space로 260 μm의 선폭 (pitch)을 보여주고 있고, 그림 3(b)는 520 μm의 여자코일 선폭을 갖는 센서의 단면 사진으로 여자코일과 검출코일의 선폭은 각각 520 μm과 260 μm을 보이고 있다. 여자코일과 검출코일의 두께는 모두 약 35μm이고, 이렇게 코일의 단면적이 커지면 코일의 저항이 감소하여 소비전력을 감소시킬 수 있다. 절연 층인 에폭시 보드 두께는 120 μm이고, 연자성 코어의 두께는 20μm이다. 그림 3(c)에서 보는 바와 같이 플럭스게이트 칩(chip)크기는 7.3 × 5.7 mm<sup>2</sup>로 매우 작다.



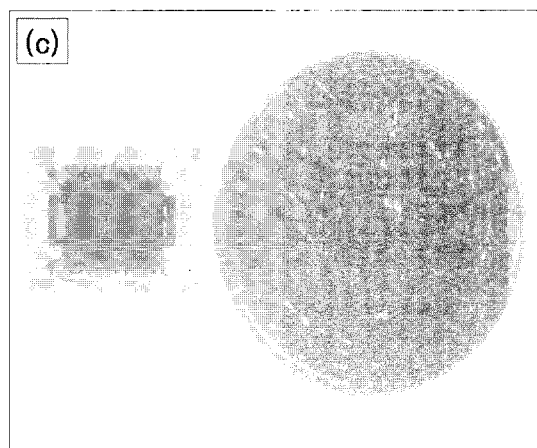
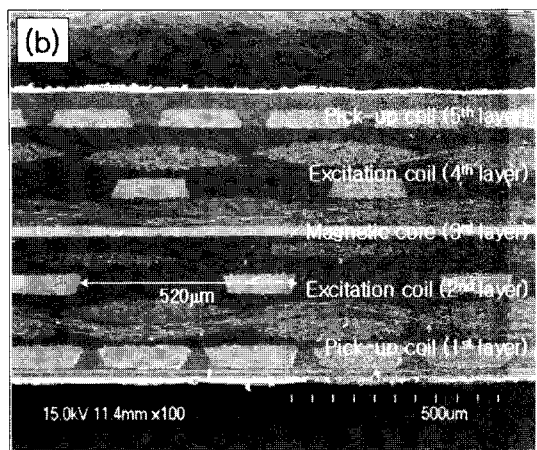


그림 3. 마이크로 플럭스게이트 자기 센서의 SEM 사진. (a) 260  $\mu\text{m}$ 의 여자코일 선폭을 갖는 센서의 단면도, (b) 520  $\mu\text{m}$ 의 여자코일 선폭을 갖는 센서의 단면도, (c) 평면도.

Fig. 3. SEM photographs of the micro fluxgate magnetic sensor. Cross-sectional view of the sensor with (a) 260  $\mu\text{m}$  excitation coil pitch and (b) 520  $\mu\text{m}$  excitation coil pitch, and (c) top view.

플럭스게이트 자기 센서의 특성을 측정하기 위해서 여자 전류 인가는 function generator (HP33120A)를 사용하였고, DC power supply (Agilent E3642A)로 magnetic shield box에 current를 흘려 원하는 자기장을 형성하였다. 또한 제2고조파 신호를 검출하기 위해 spectrum analyzer (Agilent 4395A)를 이용하였으며, 상기의 계측기들은 GPIB interface를 사용하여 computer에 의해 제어 되었다.

#### 4. 결과 및 고찰

260  $\mu\text{m}$ 의 여자코일 선폭을 갖는 센서는 21턴씩의 여자 및 검출코일로 구성되어 있으며, 520  $\mu\text{m}$ 의 여자코일 선폭을 갖는 센서는 11턴의 여자코일과 21턴의 검출코일로 제작되었다. 사각 링 형태의 연자성 코어는 500 $\mu\text{m}$ 폭으로 형성된 크기 7230  $\mu\text{m}$   $\times$  2740  $\mu\text{m}$ 의 사각 링 형태로 구성되었다. 연자성 코어의 재료로는 투자율이 약 100,000 정도이고, 보자력 (coercive field)이 0.01 Oe 이하의 코발트가 주성분인 아몰퍼스 연자성체가 사용되었다.

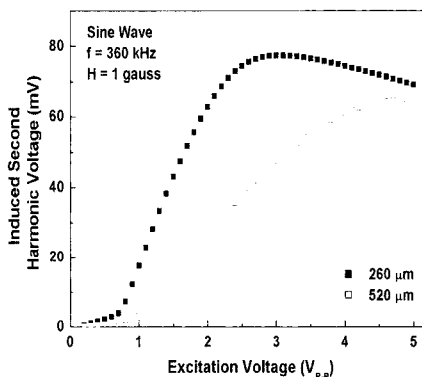


그림 4. 여자전압 변화에 따른 유도된 제2고조파 전압 변화.

Fig. 4. The induced second harmonic voltage as a function of excitation voltage.

그림 4는 여자 전압 변화에 따른 유도된 제2고조파 전압 변화를 보여주며, 측정 조건은 여자 주파수가 360 kHz이고 인가 자계가 1 gauss이다. 260  $\mu\text{m}$ 의 여자코일 선폭을 갖는 센서에서는 여자전압이 약 3  $V_{pp}$ 일 경우에 77.4 mV의 최대값을 보이며 점차 포화되어 감소하였고, 520  $\mu\text{m}$ 의 여자코일 선폭을 갖는 센서에서는 여자전압이 약 5  $V_{pp}$ 일 경우에 65.0 mV의 최대값을 보이고 있다. 이는 여자코일 선폭의 감소에 의해 낮은 여자 전압에서도 연자성체 코어를 충분히 자화시킬 수 있는 자장을 발생시킬 수 있기 때문이며, 이는 낮은 전압으로도 센서 구동을 가능케 함으로써 소비전력을 줄일 수 있다. 또한 0~5  $V_{pp}$ 의 여자전압 영역에서 260  $\mu\text{m}$ 의 여자코일 선폭을 갖는 센서에서 보다 큰 제2고조파 출력이 발생되었다.

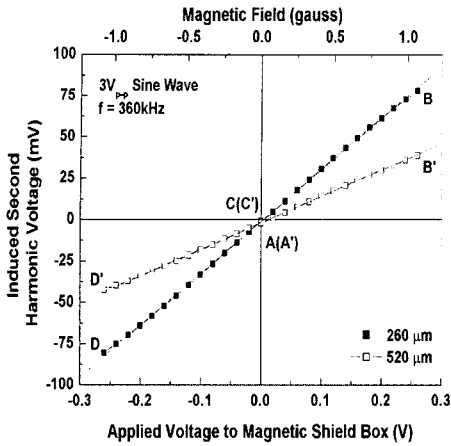


그림 5. 여자전압으로 360 kHz의 3 V<sub>P-P</sub> 정현파가 인가될 때의 선형특성.

Fig. 5. The linearity characteristics measured with excitation sine wave of 3 V<sub>P-P</sub> and 360 kHz.

그림 5는 여자전압이 3 V<sub>P-P</sub>이고 주파수가 360 kHz인 정현파가 인가될 때, 측정된 선형 특성 결과이다. 여자코일 선폭이 다른 두 개의 센서에 대해서 -1 gauss ~ +1 gauss (-100 μT ~ +100 μT)범위의 외부자계 인가는 A (A')-B(B')-C(C')-D(D')-A(A')순으로 이루어졌으며, 외부자계에 따른 이력 현상은 거의 없고, 매우 선형적인 특성을 보인다. 특히, 여자코일 선폭이 260 μm인 경우에는 780 V/T의 고 감도를 보여 주고 있으나, 520 μm의 여자코일 선폭을 갖는 센서에서는 제2고조파 출력전압이 감소하여, 388 V/T의 감도만을 보이고 있다. 고 감도를 가진 여자코일 선폭이 260 μm인 센서의 소비전력은 약 8mW로 매우 작은 값이 측정되었다.

2축 (X축과 Y축)플럭스게이트 자기 센서에 대한 회전각에 따른 제2고조파 전압 변화를 관찰하기 위해 여자코일 선폭이 260 μm인 센서 두 개를 서로 수직하게 기판에 장착하여, X축 및 Y축 자계 검출이 가능케 하였다. 지구자계 내에서 기판을 360도 회전시키면서 X축, Y축 각각의 센서로부터 출력 전압을 5도 단위로 측정하였으며, 그 결과는 그림 6(a)에서 보여주고 있다. 그림에서처럼, X축과 Y축에 대한 제2고조파 전압 변화는 각각 약 ±20 mV영역에서 사인 (sine) 곡선과 코사인 (cosine)곡선을 보이고 있다. 이런 두 센서의 사인 (sine)과 코사인 (cosine)곡

선을 X-Y plot 하면, 그림 6(b)에서처럼 방위 각을 나타낼 수 있으며, 이는 단순 방위지시 시스템이나 절대방향 정보가 필요한 휴대용 네비게이션 시스템에 활용도가 매우 높다.

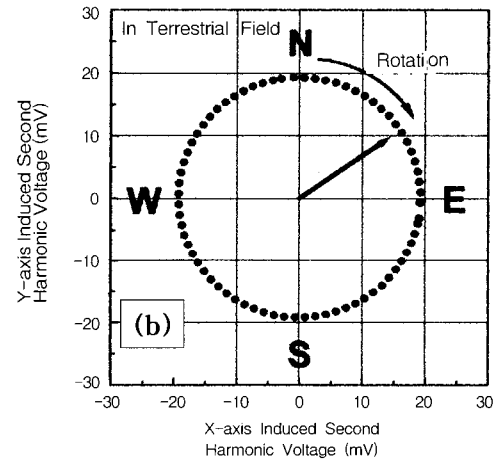
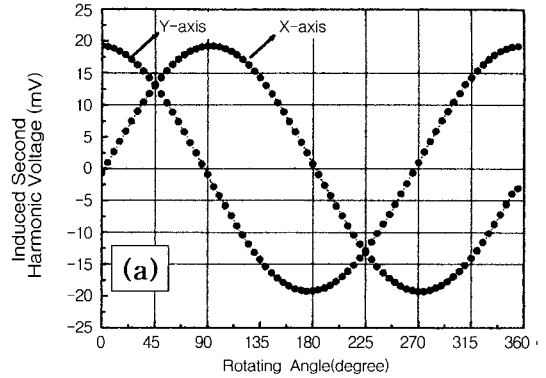


그림 6. (a) X축과 Y축 플럭스게이트 자기 센서의 회전각 변화에 따른 유도된 제2고조파 전압 변화와 (b) X-Y plot.

Fig. 6. (a) The induced second harmonic voltage of X- and Y-axis fluxgate magnetic sensors with rotating angle and (b) X-Y plot.

## 5. 결 론

마이크로 플럭스게이트 자기 센서 (micro fluxgate magnetic sensor)를 사각 링 형태의 연자성 코어와 솔레노이드 형태의 여자코일 및 검출코일로 구성하였고, 여자코일 선폭 효과를 관찰하기 위해 260 μm와 520 μm 선폭을 가진 2종의 센서를 설계, 제작하였다. 제작을 위해

PCB 다층 적층기술을 이용하였고, 연자성 코어는 약 100,000의 큰 투자율을 갖는 아몰퍼스 재료를 사용하여 고 감도 및 저 전력의 센서를 구현하였다. 여자코일 선폭이 260  $\mu\text{m}$ 인 경우가 520  $\mu\text{m}$  선폭인 경우 보다 낮은 여자전압으로 센서를 여자시킬 수 있었다. 또한 여자조건이 360 kHz, 3  $V_{p-p}$ 의 정현파일 경우에 우수한 선형특성과 780 V/T의 고 감도를 가지며, 약 8 mW의 매우 작은 소비전력이 측정되었다. 결국 여자코일 선폭의 감소는 최적 여자전압을 낮춤으로써 감도 향상과 소비전력 감소를 야기했다. 플럭스게이트 자기 센서의 크기는  $7.3 \times 5.7 \text{mm}^2$ 이며, 이런 초소형 센서는 지자기 세기인  $\pm 50 \mu\text{T}$  ( $\pm 0.5$  gauss) 영역의 미약 자기 검출에 이용될 수 있고, 특히 초소형, 저 전력화, 저 생산비가 가능하므로 절대방향 정보를 필요로 하는 휴대용 네비게이션 시스템, telematics, VR 게임기 등 다양한 응용분야에 활용도가 높다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. Thomas, "Direction responsive system", US Patent, No. 2016977, 1935.
- [2] F. Primdahl, "The fluxgate mechanism", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 6, pp. 376~383, 1970.
- [3] F. Primdahl, "The fluxgate magnetometer", J. Phys. E: Sci. Instrum., vol.12, pp. 241~253, 1979.
- [4] P. Ripka, "Improved fluxgate for compasses and position sensors", J. Magn. Mater., vol. 83, pp. 543~544, 1990.
- [5] P. Ripka, "Review of fluxgate sensors", Sensors and Actuators A, vol. 33, pp. 129~141, 1992.
- [6] T. Seitz, "Fluxgate sensor in planar microtechnology", Sensors and Actuators A, vol. 21, pp. 799~802, 1990.
- [7] S. Kawahito, H. Sato, M. Sutoh, and Y. Tadokoro, "High-resolution micro fluxgate sensing elements using closely coupled coil structures", Sensors and Actuators A, vol. 54, pp. 612~617, 1996.
- [8] S. Choi, S. Kawahito, K. Takahashi, Y. Matsumoto, M. Ishida, and Y. Tadokoro, "A planar fluxgate magnetic sensor for on-chip integration", Sensors and Materials, vol. 9, no. 4, pp. 241~252, 1997.
- [9] T. Liakopoulos and C. Ahn, "A micro-fluxgate magnetic sensor using micromachined planar solenoid coils", Sensors and Actuators A, vol. 77, pp. 66~72, 1999.
- [10] P. Ripka, S. Kawahito, S. Choi, A. Tipek, and M. Ishida, "Micro-fluxgate sensor with closed core", Sensors and Actuators A, vol. 91, pp. 65~69, 2001.
- [11] O. Dezuari, E. Belloy, S. Gilbert, and M. Gijs, "Printed circuit board integrated fluxgate sensor", Sensors and Actuators A, vol. 81, pp. 200~203, 2000.
- [12] Y. Tamura, "Weak-field magnetic field sensor having etched circuit coils", US Patent, No. 5936403A, 1999.

---

 著 者 紹 介
 

---

**최 원 열**

1989~1993 한양대학교 무기재료공학과 학사

1993~1998 한국과학기술원 석사(무기재료) / 박사 (재료)

1998~1999 미국 펜실베니아

주립대학교 Post Doc.

2000~2002 삼성종합기술원 전문연구원

2002~현재 강릉대학교 금속재료공학과 조교수

주관심 분야 : 기능성재료 (유전/자성재료), MEMS, Sensor

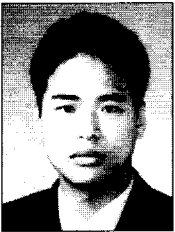
**최 상 언**

1992~1997 일본 토요하시 기술과학대 석사(전기/전자) / 박사(시스템정보)

1997~현재 삼성종합기술원 전문연구원

주관심 분야 : MEMS, Sen-

sor, ASIC 설계

**황 준 식**

1991~1997 한밭대학교 재료공학과 학사

1997~1999 충남대학교 재료공학과 석사

1999~현재 삼성종합기술원 연구원

주관심 분야 : MEMS, Sensor