

## 인쇄회로 기판에 내장된 마이크로 플럭스게이트 센서

### A MICRO FLUXGATE SENSOR IN PRINTED CIRCUIT BOARD (PCB)

최원열, 황준식, 나경원, 강명삼\*, 최상언

(Won-Youl Choi, Jun-Sik Hwang, Kyoung-Won Na, Myung-Sam Kang\*, and Sang-On Choi)

#### Abstract

This paper presents a micro fluxgate magnetic sensor in printed circuit board (PCB). The fluxgate sensor consists of five PCB stack layers including one layer magnetic core and four layers of excitation and pick-up coils. The center layer as a magnetic core is made of a micro patterned amorphous magnetic ribbon with extremely high DC permeability of  $\sim 100,000$  and the core has a rectangular-ring shape. The amorphous magnetic core is easily saturated due to the low coercive field and closed magnetic path for the excitation field. Four outer layers as an excitation and pick-up coils have a planar solenoid structure. The chip size of the fabricated sensing element is  $7.3 \times 5.7 \text{mm}^2$ . Excellent linear response over the range of  $-100 \mu\text{T}$  to  $+100 \mu\text{T}$  is obtained with  $540 \text{V/T}$  sensitivity at excitation square wave of  $3V_{p-p}$  and  $360 \text{kHz}$ . The very low power consumption of  $\sim 8 \text{mW}$  was measured. This magnetic sensing element, which measures the lower fields than  $50 \mu\text{T}$ , is very useful for various applications such as: portable navigation systems, military research, medical research, and space research.

**Key Words** : micro, fluxgate, magnetic, sensor, PCB.

#### 1. 서 론<sup>1)</sup>

플럭스게이트 자기 센서는 상온에서 사용할 수 있는 센서로서는 가장 고감도 및 고분해능의 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 흐름 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 코

어의 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 측정하므로써 외부 자계의 세기를 알 수 있다.

플럭스게이트 자기 센서의 연구는 1930년대 초반부터 이루어졌으며, 1935년 Thomas에 의해 처음으로 특허 등록이 이루어졌다.[1] 또한, 원리 및 소자 구성은 Primdahl 및 Ripka에 의해서 종합 보고되었다.[2-5] 산업의 발달과 더불어 항공기, 선박 및 차량의 위치인식 시스템, 교통량 검출하는 소자로서 이용되고 있으며, 가상현실 공간에서의 움직임 감지, HDTV의 지자기 보상 및 색변짐 보상, 의료용으로 심자도 측정 및 환자 재활용, 휴대용 위치 인식용 소자, ITS등 최근 다양한 응용을 모색하고 있다. 이

MEMS Lab. 삼성종합기술원  
(수원시 우체국 사서함 111)  
Fax: 031-280-9473  
E-mail : cw@saic.samsung.co.kr  
\* MLB R&D Center, 삼성전기(주)  
(충남 연기군 동면 명학리 581)

러한 응용 범위의 확대에 있어서 소형, 경량 및 저가격화는 플럭스게이트 자기 센서에 있어서 필수적인 요건이다.

최근 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 PCB기판의 적층기술을 이용한 방법이다. 먼저 실리콘 마이크로머시닝 기술을 이용한 것으로는, 1990년대 초에 Seitz 에 의해서 자성박막 코아와 검출코일을 실리콘에 집적하여 미약자계 검출에 이용한 센서가 최초로 보고되었으며, [6] 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 보고되는 등 상당한 진전이 이루어졌다. [7-12] 또한 PCB 적층기술을 이용한 방법으로는 Dezuari 및 APlus Co.에 의해 보고되고 있으며, 크기, 성능 및 가격 측면에서 많은 경쟁력을 가지고 있다. [13-15]

본 논문에서는 새로운 PCB 적층기술을 이용한 방법으로 마이크로 플럭스게이트 자기 센서를 제작하였으며, 이의 새로운 센서 구조, 제작 방법 및 특성에 관하여 논하였으며, 상용화를 위한 방향을 제시하였다.

## 2. 설계 및 구조

그림 1은 PCB의 적층공정을 이용하여 제작된 차동 여자형 플럭스게이트 자기 센서의 설계 구조도이다. 이 구조는 연자성체 코아, 여자코일 및 검출코일로 구성되어 있으며, 고투자율의 연자성체 코아와 미소 선폭(pitch)의 코일을 사용하므로써, 여자전압과 소비전력을 낮출 수 있다. 그림에서 보듯이 설계된 플럭스게이트 자기 센서는 5층으로 구성된다. 5개의 층중에 가운데인 3번째층에 연자성 코아의 구조를 형성하고, 그 외각으로 여자코일과 검출코일의 솔레노이드 코일구조를 구현한다. 연자성 코아의 재료로는 약 100,000의 투자율을 갖는 아몰퍼스(amorphous) 재료를 사용하였고, 사각형 형태의 구조로 자기 플럭스의 누설을 방지하였다. 여자코일과 검출코일의 재료로는 전기전도도가 좋은 구리(copper)를 사용하였다.

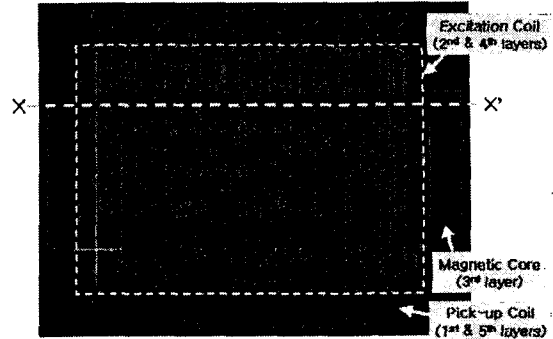


그림 1. PCB공정을 이용한 차동형 플럭스게이트 자기 센서의 설계 구조도.

Fig. 1. New structure of the differential fluxgate sensor fabricated using printed circuit board (PCB) technology.

## 3. 실험

마이크로 플럭스게이트 자기 센서를 제작하기 위한 PCB의 적층공정은 3번째 층인 연자성 코아의 형성에서 시작된다. 2번째 층인 구리 호일(foil)과 3번째 층인 20  $\mu\text{m}$  두께의 코발트(Co)가 주성분인 아몰퍼스 연자성체 리본을 에폭시 보드(epoxy board)와 함께 hot pressing을 이용하여 적층시킨다. 적층시 사용되는 에폭시 보드는 접합층 및 절연층의 두가지 역할을 한다. 적층된 연자성 코아를 사각형 형태의 구조를 구현하기 위해 wet etching하고, 그 위에 다시 4번째 층인 구리 호일을 적층, 패턴닝(patterning)하고, 2번째 층과 드루홀(through hole)로 통전시켜서 솔레노이드 형태의 여자코일을 형성한다. 드루홀의 형성은 드릴링(drilling)으로 홀(hole)을 만든 후에 동도금으로 홀을 채워 통전시킨다. 그 후에 최외층으로 1번째와 5번째 층을 여자코일 형성시와 같은 방법으로 적층, 패턴닝, 드릴링, 동도금하여 검출코일을 형성한다. 최종적으로 pad를 형성한다.

그림 2는 새로운 PCB 적층공정을 이용하여 제작된 플럭스게이트 자기 센서의 단면과 평면 전자현미경(SEM) 사진이다. 그림에서 보여주는 것처럼 여자코일과 검출코일은 180  $\mu\text{m}$  width와 80  $\mu\text{m}$  space로 260  $\mu\text{m}$ 의 선폭(pitch)을 보여주고 있다. 여자코일과 검출코일의 두께는 약 35  $\mu\text{m}$ 이고, 이렇게 코일의 단면적이 커지면 코일의 저항이 감소하여 소비전력을 감소시킬 수 있다. 절연층인 에폭시 보드 두께

는  $120\ \mu\text{m}$ 이고, 연자성 코어의 두께는  $20\ \mu\text{m}$ 이다. 플럭스게이트 칩(chip) 크기는  $7.3 \times 5.7\ \text{mm}^2$ 로 매우 작다.

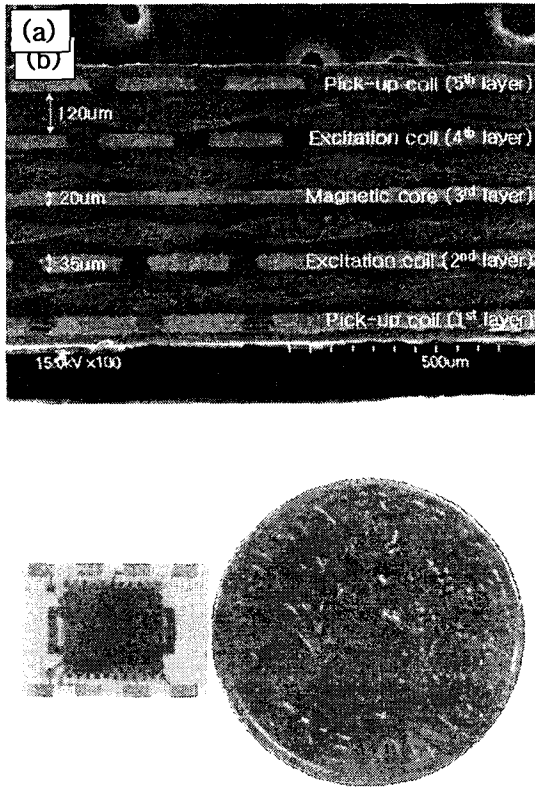


그림 2. 마이크로 플럭스게이트 자기 센서의 SEM 사진. (a) 단면도 (b) 평면도.

Fig. 2. SEM photographs of the micro fluxgate sensor fabricated by the new printed circuit board (PCB) technology. (a) Cross-sectional and (b) plan view.

플럭스게이트 자기 센서의 특성 측정을 위해 여자 전류를 인가하는 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

제작된 마이크로 플럭스게이트 자기 센서는 각각 21턴씩의 여자코일 및 검출코일과 사각링 형태의 연자성 코어로 구성되어 있다. 사각링 형태의 연자성 코어는  $500\ \mu\text{m}$ 폭으로 형성된 크기  $7230\ \mu\text{m} \times 2740\ \mu\text{m}$ 의 사각링으로 제작되었다. 연자성 코어의 재료로는 투자율이 약 100,000 정도이고, 보자력(coercive field)이  $0.01\text{Oe}$  이하의 코발트가 주성분인 아몰퍼스 연자성체가 사용되었다.

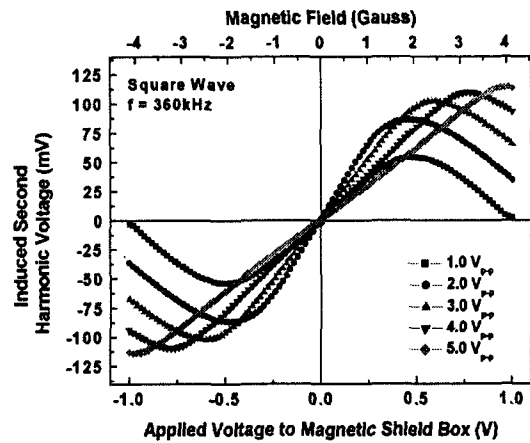


그림 3. 외부자계에 변화(-4 gauss에서 +4 gauss 까지)에 따른 유도된 제2고조파 전압

Fig. 3. The induced second harmonic voltage as a function of magnetic field for the relatively wide range of 4 gauss to +4 gauss.

그림 3은 외부자계에 변화(-4 gauss에서 +4 gauss까지)에 따른 유도된 제2고조파 전압 변화를 보여준다. 여자전압이  $3V_{p-p}$ 일 경우에 외부자계가 -2 gauss에서 +2 gauss영역에선 선형적으로 증가하는 특성을 보여주고 있으며, 그 이상의 외부자계에서는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 또한 유도된 제2고조파 전압의 최대값은 여자전압의 증가에 따라 큰 외부 자계쪽으로 이동하며, 선형특성을 보이는 영역은 증가한다. 특히  $5V_{p-p}$ 일 경우는  $\pm 3$  gauss이상 까지도 선형영역의 폭이 증가한 특성을 보이고 있으며, 이런 우수한 선형특성은 여러 응용면에 있어서 매우 유용하다.

그림 4는 여자전압이  $3V_{p-p}$ 이고 주파수가 360kHz 인 구형파가 인가될 때, 측정된 선형특성 결과이다.

외부자계 인가는 A-B-C-D-A순으로 이루어졌으며, 외부자계에 따른 이력현상은 거의 없었다. 그림에서 보여주는 것처럼,  $-100\mu\text{T}$ 에서  $+100\mu\text{T}$ 까지의 외부자계 영역에서 매우 선형적인 특성을 보여주고, 이력현상은 관찰되지 않으며,  $540\text{V/T}$ 의 고감도를 보여준다. 또한 제작된 마이크로 플럭스게이트 자기 센서의 소비전력은 약  $8\text{mW}$ 로 매우 작은 값이 측정되었다.

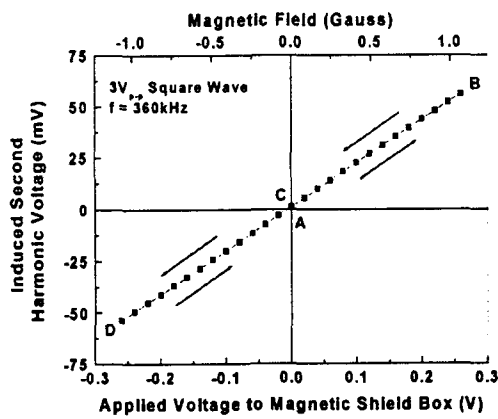


그림 4. 여자전압으로 360kHz의  $3\text{V}_{\text{P-P}}$  구형파가 인가될때의 선형특성.

Fig. 4. The linearity characteristics measured with excitation square wave of  $3\text{V}_{\text{P-P}}$  and 360kHz.

## 5. 결론

Printed circuit board (PCB)에 내장된 초소형 플럭스게이트 자기 센서 (micro fluxgate magnetic sensor)를 설계, 제작하였다. 이 플럭스게이트 자기 센서는 사각형 형태의 연자성 코어와 솔레노이드 형태의 여자코일 및 검출코일로 구성되며, 제작을 위해 모두 5층의 기판을 적층하였다. 연자성 코어는 약 100,000의 큰 투자율을 갖는 아몰퍼스 재료를 사용하여, 고감도 및 저전력의 센서를 구현하였다. 이렇게 제작된 자기 센서는 여자조건이 360kHz,  $3\text{V}_{\text{p-p}}$ 의 구형파일 경우에 우수한 선형특성과  $540\text{V/T}$ 의 고감도를 갖으며, 약  $8\text{mW}$ 의 작은 소비전력이 측정되었다. 플럭스게이트 자기 센서의 크기는  $7.3 \times 5.7\text{mm}^2$ 이며, 이런 초소형 센서는  $50\mu\text{T}$  이하의 미약자계 검출에 이용될 수 있

고, 특히 초소형, 저전력화, 저생산비가 가능하므로 절대방향 정보를 필요로 하는 휴대용 navigation 시스템, telematics, VR 게임기 등 다양한 응용분야에 적용할 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] H. Thomas, "Direction responsive system", US Patent No. 2016977, 1935.
- [2] F. Primdahl, "Bibliography of fluxgate magnetometers", Publications of the Earth Physics Branch, vol. 41, no. 1, 1970.
- [3] F. Primdahl, "The fluxgate magnetometer", J. Phys. E: Sci. Instrum., vol.12, Printed in Great Britain, 1979.
- [4] F. Primdahl, R. Coles, "A bibliography of magnetometers", Appendix 1, Proc. Int. Workshop on Magnetic Observatory Instruments, Ottawa, Canada, July 30 Aug. 9, 1986.
- [5] P. Ripka, "Review of fluxgate sensors", Sensors and Actuators, vol. A33, pp. 129-141, 1992.
- [6] T. Seitz, "Fluxgate sensor in planar microtechnology", Sensors and Actuators, vol. A21-A23, pp. 799-802, 1990.
- [7] S. Kawahito, Y. Sasaki, M. Ashiki, T. Nakamura, "Micromachined Solenoids for Highly Sensitive Magnetic Sensor", The 6th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, pp. 1077-1080, 1991.
- [8] S. Kawahito, H. Sato, M. Sutoh, Y. Tadokoro, "High-resolution micro fluxgate sensing elements using closely coupled coil structures", Sensors and Actuators, vol. A54, pp. 612-617, 1996.
- [9] R. Gottfried-Gottfried, W. Budde, R. Jahne, H. Kuck, B. Saue r, S. Ulbricht, U. Wende, "A miniaturized magnetic field sensor system consisting of a planar fluxgate sensor and a CMOS readout circuitry", Transducers95, Eurosens IX, pp. 229-232, 1995.

- [10] S. Choi, S. Kawahito, K. Takahashi, Y. Matsumoto, M. Ishida, Y. Tadokoro, "A planar fluxgate magnetic sensor for on-chip integration", *Sensors and Materials*, vol. 9, no. 4, pp. 241-252, 1997
- [11] T. Liakopoulos, C. Ahn, "A micro-fluxgate magnetic sensor using micromachined planar solenoid coils", *Sensors and Actuators*, vol. 77, pp. 66-72, 1999.
- [12] P. Ripka, S. Choi, S. Kawahito, A. Tipek, M. Ishida, "Micro-fluxgate sensor with double-sided core", *EMSA 2000 (Third European Conference on Magnetic Sensors and Actuators)*, Dresden, pp. 167-168, 2000.
- [13] O. Dezuari, E. Belloy, S. Gilbert, and M. Gijs, "New hybrid technology for planar fluxgate sensor fabrication", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 35, no. 4, pp. 2111-2117, 1999.
- [14] O. Dezuari, E. Belloy, S. Gilbert, M. Gijs, "Printed circuit board integrated fluxgate sensor", *Sensors and Actuators*, vol. 81, pp. 200-203, 2000.
- [15] Y. Tamura, "Weak-field magnetic field sensor having etched circuit coils", *US Patent No. 5936403A*, 1999.