

논문 15-8-8

PCB 기판에 내장된 마이크로 플럭스게이트 센서

Embedded Micro Fluxgate Sensor in Printed Circuit Board (PCB)

최원열*, 황준식*, 강명삼**, 최상언*

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

Abstract

This paper presents a micro fluxgate 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 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 540V/T sensitivity at excitation square wave of $3V_{\text{pp}}$ and 360kHz . 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. 서론

플럭스게이트 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 센서의 기본 구성은 고투자율 재

료로부터 형성된 연자성 코아에 감겨져 있는 여자 코일과 검출코일로 형성되어 있다. 기본 검출원리는 연자성 코아의 비선형 특성 즉 포화특성을 이용한다. 여자코일에 충분히 큰 교류전류를 공급하여 자계를 발생시키면, 코아 내부의 자속 밀도는 주기적으로 포화한다. 이때 외부 측정자계가 주어지면 코아 내부의 자속 밀도를 변화시키며, 검출 코일은 이 자속의 변화량을 측정하므로써 외부 자계의 세기를 알 수 있다.

플럭스게이트 센서의 연구는 1930년대 초반부터 이루어졌으며, 1935년 Thomas에 의해 처음으로 특허 등록이 이루어졌다[1]. 또한, 원리 및 소자 구성은 Primdahl 및 Ripka에 의해서 종합 보고 되었다[2-5]. 산업의 발달과 더불어 항공기, 선박 및 차량의 위치인식 시스템, 교통량 검출하는 소자로서 이용되고 있으며, 가상현실 공간에서의 움직임 감

* : MEMS Lab. 삼성종합기술원

(수원시 우체국 사서함 111)

Fax : 031-280-9473

E-mail : cwy@sait.samsung.co.kr

** : MLB R&D Center, 삼성전기(주)

(충남 연기군 동면 명학리 581)

2002년 5월 15일 접수, 2002년 5월 27일 1차 심사완료,

2002년 6월 24일 2차 심사완료, 2002년 7월 23일 최종 심사완료

지, HDTV의 지자기 보상 및 색번짐 보상, 의료용으로 심자도 측정 및 환자 재활용, 휴대용 위치 인식용 소자, ITS등 최근 다양한 응용을 모색하고 있다[6]. 이러한 응용 범위의 확대에 있어서 소형, 경량 및 저가격화는 플럭스게이트 센서에 있어서 필수적인 요건이다.

최근 이런 소형, 경량 및 저가격의 플럭스게이트 센서를 제작하려는 시도는 많이 이루어지고 있으며, 크게 두가지 제작 방법으로 구분할 수 있다. 첫째는 실리콘 집적회로 기술이 근간이 된 마이크로머신닝 (micromachining) 방법이며, 둘째는 PCB 기판의 적층기술을 이용한 방법이다. 먼저 실리콘 마이크로머신닝 기술을 이용한 것으로는, 1990년대 초에 Seitz에 의해서 자성박막 코아와 검출코일을 실리콘에 집적하여 미약자계 검출에 이용한 센서가 최초로 보고 되었으며[7], 플럭스게이트 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[8-13]. 또한 PCB 적층 기술을 이용한 방법으로는 Dezuari 및 APlus Co.에 의해 보고 되고 있으며, 크기, 성능 및 가격 측면에서 많은 경쟁력을 가지고 있다[14-16].

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

2. 설계 및 구조

플럭스게이트 센서의 설계/제작에 있어서, 그림 1에 나타낸 차동 여자형 플럭스게이트 센서의 기본구조를 이용한다. 이 구조는 연자성체 코아, 여자코일 및 검출코일로 구성되어 있으며, 고투자율의 연자성체 코아와 미소 선폭(pitch)의 코일을 사용하므로써, 여자전압과 소비전력을 낮출 수 있다. 이 구조는 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 성분

에 더하여 우수차 고조파 성분이 나타나게 된다. 이 우수차 (제n차(n=2, 4, 6.....))의 고조파 성분 중에서도 제2고조파에서 최대의 파고치를 갖게 되며, 이런 제2고조파를 검출하므로써, 오프셋(offset)이 없는 자계 검출이 가능해진다. 제2고조파 (Second Harmonics) 검출방식에 의한 감도(S_B)는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다[9].

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

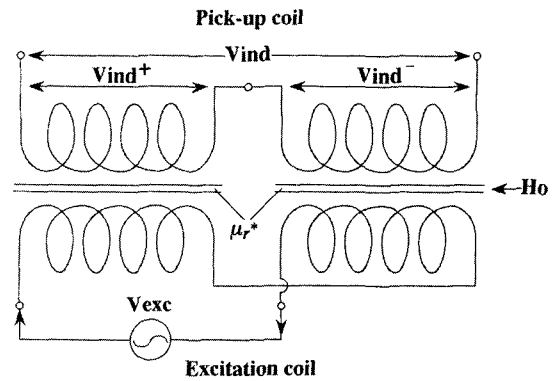


그림 1. 차동여자형 플럭스게이트 센서의 기본구조.
Fig. 1. The basic configuration of the differential fluxgate sensor.

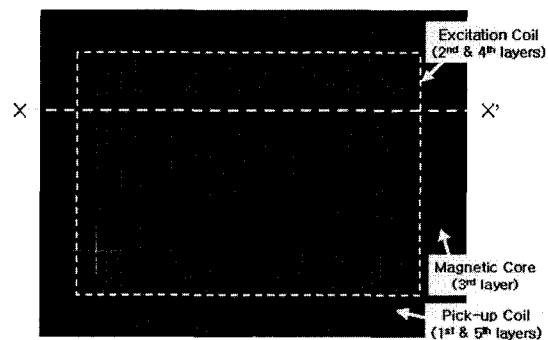


그림 2. PCB공정을 이용한 차동형 플럭스게이트 센서의 설계 구조도.
Fig. 2. New structure of the differential fluxgate sensor fabricated using printed circuit board (PCB) technology.

여기서, N 은 검출코일의 감은 횟수, A 는 연자성 코아의 단면적, μ_{eff} 는 연자성 코아의 실효 투자율 (effective permeability), f_{exc} 는 여자 주파수, H_s 는 연자성 코아의 포화자장, H_m 는 최대 여자자장을 의미한다. 이식에서 볼 수 있듯이, $H_m=2H_s$ 의 경우에 최대의 감도를 얻을 수 있다. 그림 2는 PCB의 적층공정을 이용하여 제작된 플럭스게이트 센서의 설계 구조도이며, 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, 사각링 형태의 구조로 자기 플럭스의 누설을 방지하였다. 여자코일과 검출코일의 재료로는 전기전도도가 좋은 구리(copper)를 사용하였다.

3. 실험

마이크로 플럭스게이트 센서를 제작하기 위한 PCB의 적층공정은 3번째 층인 연자성 코아의 형성에서 시작된다. 2번째 층인 구리 호일(foil)과 3번째 층인 20 μ 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 사각링 형태의 구조를 구현하기 위해 wet etching 하고, 그 위에 다시 4번째 층인 구리 호일을 적층, 패터닝(patterning)하고, 2번째 층과 드루 홀(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, 패터닝, 드릴링, 동도금하여 검출코일을 형성한다. 최종적으로 pad를 형성한다.

그림 3은 새로운 PCB 적층공정을 이용하여 제작된 플럭스게이트 센서의 단면과 평면 전자현미경(SEM) 사진이다. 그림에서 보여주는 것처럼 여자코일과 검출코일은 180 μ m width와 80 μ m space로 260 μ m의 선폭(pitch)을 보여주고 있다. 여자코일과 검출코일의 두께는 약 35 μ m이고, 이렇게 코일의 단면적이 커지면 코일의 저항이 감소하여 소

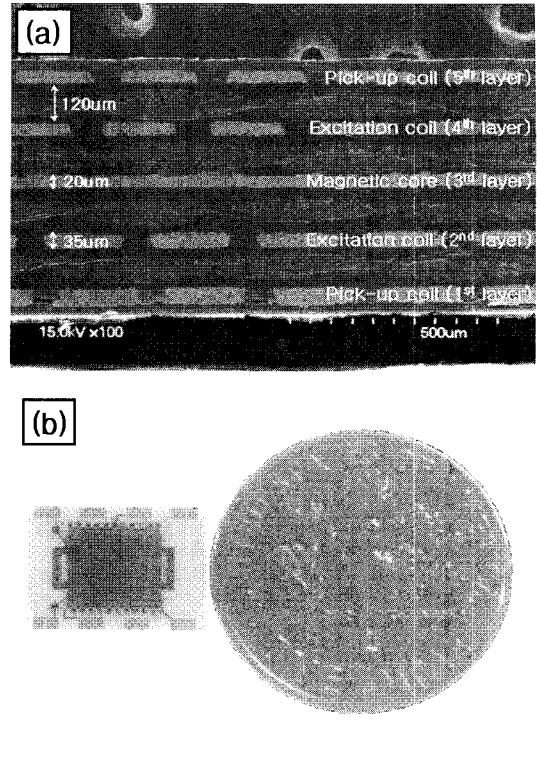


그림 3. 마이크로 플럭스게이트 센서의 SEM 사진.(a) 단면도 (b) 평면도

Fig. 3. SEM photographs of the micro fluxgate sensor fabricated by the new printed circuit board (PCB) technology. (a) Cross-sectional and (b) plan view

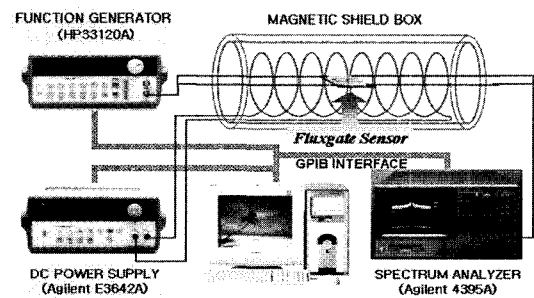


그림 4. 플럭스게이트 센서의 측정시스템 구성도.
Fig. 4. The measurement system for the fluxgate sensor.

비전력을 감소시킬 수 있다. 절연층인 에폭시 보드 두께는 120 μm 이고, 연자성 코아의 두께는 20 μm 이다. 플럭스게이트 칩(chip)크기는 7.3 \times 5.7mm²로 매우 작다.

그림 4는 플럭스게이트 센서의 특성을 측정하기 위한 측정 시스템의 구성도이다. 플럭스게이트 센서에 여자전류를 인가하기 위해서 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 센서는 각각 21턴씩의 여자코일 및 검출코일과 사각링 형태의 연자성 코아로 구성되어 있다. 사각링 형태의 연자성 코아는 500 μm 폭으로 형성된 크기 7230 $\mu\text{m}\times$ 2740 μm 의 사각링으로 제작되었다. 연자성 코아의 재료로는 투자율이 약 100,000 정도이고, 보자력(coercive

field)이 0.01Oe 이하의 코발트가 주성분인 아몰퍼스 연자성체가 사용되었다.

그림 5는 외부자계의 변화(-4 gauss에서 +4 gauss까지)에 따른 유도된 제2고조파 전압 변화를 보여준다. 여자전압이 3V_{p-p}일 경우에 외부자계가 -2 gauss에서 +2 gauss영역까지는 선형적으로 증가하는 특성을 보여주고 있으며, 그 이상의 외부자계에서는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 외부자계의 증가와 더불어 phase shift의 정도가 증가하여, 서로 상반된 검출 신호가 overlap되면서 출력신호를 감쇄시키기 때문이다. 또한 유도된 제2고조파 전압의 최대값은 여자전압의 증가에 따라 큰 외부 자계쪽으로 이동하며, phase가 이동할 수 있는 영역이 동시에 증가하기 때문에 선형특성을 보이는 영역은 증가한다. 특히 5V_{p-p}일 경우는 ± 3 gauss이상까지도 선형영역의 폭이 증가한 특성을 보이고 있으며, 이런 우수한 선형특성은 여러 응용면에 있어서 매우 유용하다.

그림 6은 여자전압이 3V_{p-p}이고 주파수가 360kHz인 구형파가 인가될 때, 측정된 선형특성 결과이다. 외부자계 인가는 A-B-C-D-A순으로 이루어졌으며, 외부자계에 따른 이력현상은 거의 없었다. 그림에서 보여주는 것처럼, -100 μT 에서 +100 μT 까지의 외부자계 영역에서 매우 선형적인 특성을 보여주고, 540V/T의 고감도를 보여준다.

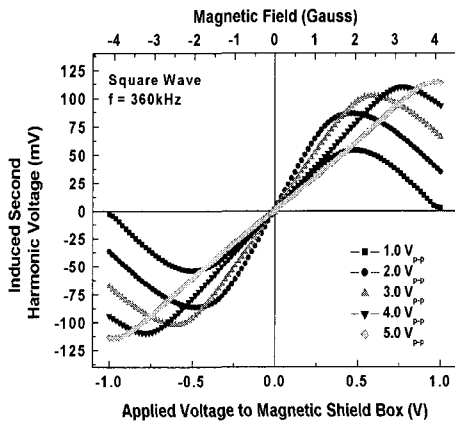


그림 5. 외부자계의 변화(-4 gauss에서 +4 gauss 까지)에 따른 유도된 제2고조파 전압

Fig. 5. The induced second harmonic voltage as a function of magnetic field for the relatively wide range of 4 gauss to +4 gauss.

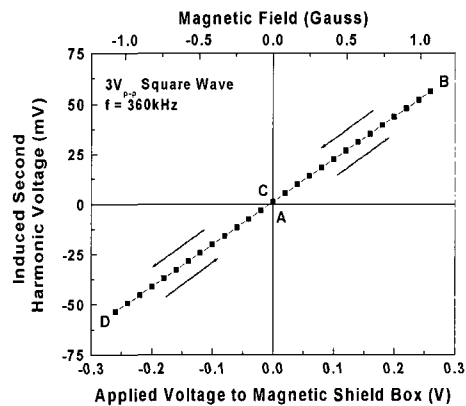


그림 6. 여자전압으로 360kHz의 3V_{p-p} 구형파가 인가될때의 선형특성.

Fig. 6. The linearity characteristics measured with excitation of square wave of 3V_{p-p} and 360kHz.

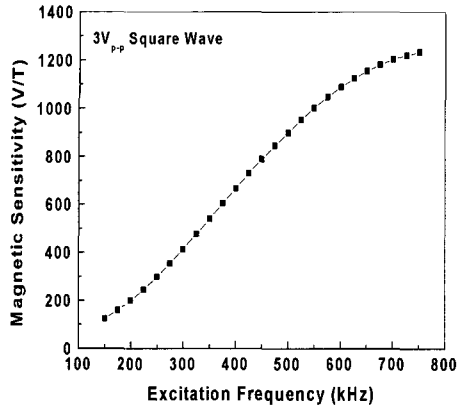


그림 7. 여자주파수 변화에 따른 자계 감도.

Fig. 7. The magnetic sensitivity as a function of excitation frequency.

또한 제작된 마이크로 플럭스게이트 센서의 소비 전력은 약 8mW로 매우 작은 값이 측정되었다.

여자주파수 변화에 따른 자계 감도는 그림 7에서 보여주고 있다. 이 그림에서처럼, 여자주파수가 증가할수록 자계 감도는 증가하고 있으며, 이런 결과는 식 (1)과 잘 일치하고 있다. 또한, 여자주파수가 크게 증가함에 따라 감도의 증가폭이 감소하는 경향은 주파수가 증가함에 따라 여자코일의 임피던스 증가와 연자성체 코아의 투자율 감쇄현상에 의해 최적의 여자전압의 조건이 바뀌기 때문이다.

5. 결론

Printed circuit board (PCB)에 내장된 초소형 플럭스게이트 센서 (micro fluxgate sensor)를 설계, 제작하였다. 이 플럭스게이트 센서는 사각링 형태의 연자성 코아와 솔레노이드 형태의 여자코일 및 검출코일로 구성되며, 제작을 위해 모두 5층의 기판을 적용하였다. 연자성 코아는 약 100,000의 큰 투자율을 갖는 아몰퍼스 재료를 사용하여, 고감도 및 저전력의 센서를 구현하였다. 이렇게 제작된 센서는 여자조건이 360kHz, 3V_{pp}의 구형파일 경우에 우수한 선형특성과 540V/T의 고감도를 가지며, 약 8mW의 작은 소비전력이 측정되었다. 플럭스게이트 센서의 크기는 7.3×5.7mm²이며, 이

런 초소형 센서는 지자기 세기인 ±50μT (±0.5 gauss) 영역의 미약 자계 검출에 이용될 수 있고, 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, 2016977, 1935.
- [2] F. Primdahl, "The fluxgate mechanism", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 6, p. 376, 1970.
- [3] F. Primdahl, "The fluxgate magnetometer", J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 12, p. 241, 1979.
- [4] P. Ripka, "Improved fluxgate for compasses and position sensors", J. Magn. Mater., Vol. 83, p. 543, 1990.
- [5] P. Ripka, "Review of fluxgate sensors", Sensors and Actuators A, Vol. 33, p. 129, 1992.
- [6] S. Choi and S. Ahn, "Micro fluxgate magnetic sensor", Bulletin of KIEEME, Vol. 14, No. 5, p. 16, 2001.
- [7] T. Seitz, "Fluxgate sensor in planar micro-technology", Sensors and Actuators A, Vol. 21, p. 799, 1990.
- [8] S. Kawahito, Y. Sasaki, M. Ashiki, and T. Nakamura, "Micromachined Solenoids for Highly Sensitive Magnetic Sensor", The 6th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, p. 1077, 1991.
- [9] 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, p. 612, 1996.
- [10] R. Gottfried-Gottfried, W. Budde, R. Jahne, H. Kuck, B. Sauer, S. Ulbricht, and U. Wende, "A miniaturized magnetic field sensor system consisting of a planar fluxgate

- sensor and a CMOS readout circuitry", Transducers'95, Eurosensors IX, p. 229, 1995.
- [11] 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, p. 241, 1997
- [12] T. Liakopoulos and C. Ahn, "A micro-fluxgate magnetic sensor using micromachined planar solenoid coils", Sensors and Actuators A, Vol. 77, p. 66, 1999.
- [13] P. Ripka, S. Kawahito, S. Choi, A. Tipek, and M. Ishida, "Micro-fluxgate sensor with closed core", Sensors and Actuators A, Vol. 91, p. 65, 2001.
- [14] 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, p. 2111, 1999.
- [15] O. Dezuari, E. Belloy, S. Gilbert, and M. Gijs, "Printed circuit board integrated fluxgate sensor", Sensors and Actuators A, Vol. 81, p. 200, 2000.
- [16] Y. Tamura, "Weak-field magnetic field sensor having etched circuit coils", US Patent, 5936403A, 1999.