

논문 17-5-8

자성체 코어 형상에 따른 마이크로 플럭스게이트 센서의 검출 특성

The Performance of Micro Fluxgate Sensor with Magnetic Core Shape

조중희², 최원열^{1,a}

(Jung-Hee Cho² and Won-Youl Choi^{1,a})

Abstract

A fluxgate magnetic sensor consists of a solenoid excitation coil, pick-up coil, and magnetic core. We presents the effect of magnetic core shape in a micromachined fluxgate sensor. To observe the performance of fluxgate sensor with magnetic core side width and gap, side width of 125 μm , 250 μm , and 500 μm were designed in a rectangular-ring shaped core and the gaps of 0 μm , 50 μm , and 100 μm were also fabricated in a racetrack shaped core. The solenoid coils and magnetic core were separated by benzocyclobutane(BCB) which had high insulation and good planarization characters. Copper coil patterns of 10 μm width and 6 μm thickness were electroplated on Ti(300 \AA) / Cu(1500 \AA) seed layers. 3 μm thick $\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}$ (permalloy) film for the magnetic core was also electroplated under 2000 gauss to induce the magnetic anisotropy. The magnetic core had the high DC effective permeability of $\sim 1,300$ and coercive field of ~ 0.1 Oe. Because the magnetic cores of 500 μm side width and 0 μm gap had a low magnetic flux leakage, high sensitivity of ~ 350 V/T were measured at excitation condition of 3 V_{P-P} and 2 MHz square wave. The power consumption of ~ 14 mW was measured. The fabricated fluxgate sensor had the very small actual size of 3.0×1.7 mm². When two fluxgates were perpendicularly aligned in terrestrial field, their two-axis output signals were very useful to commercialize an electronic azimuth compass for the portable navigation system.

Key Words : Micro, Fluxgate, Magnetic, Sensor, Racetrack

1. 서론

상온에서 사용할 수 있는 자기 센서로써 플럭스 게이트 센서는 가장 고감도 및 고분해능의 특성을 가지고 있으며, $10^{-11} \sim 10^{-4}$ T의 저자계 영역에서도 직류 및 저주파 교류 자계의 크기 및 방향을 검출할 수 있다. 플럭스게이트 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[1-5].

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

1. 강릉대학교 금속재료공학과
(강원도 강릉시 지변동 123)
2. 강릉대학교 세라믹공학과
a. Corresponding Author : cwy@kangnung.ac.kr
접수일자 : 2004. 1. 30
1차 심사 : 2004. 2. 23
심사완료 : 2004. 3. 13

의 움직임 감지, HDTV의 지자기 보상 및 색번짐 보상, 의료용으로 심장도 측정 및 환자 재활용, 휴대용 위치 인식용 소자, ITS등 최근 다양한 응용을 모색하고 있다[6]. 이러한 응용 범위의 확대에 있어서 소형, 경량 및 저가격화는 필수적인 요건이며, 최근에 실리콘 집적회로 기술을 바탕으로 한 마이크로머시닝(micromachining) 방법을 이용하여 제작하려는 많은 시도가 있다[7-13].

한편 플럭스게이트 센서의 크기 및 특성에 큰 영향을 주는 자성체 코어의 형상(코어 측면 폭 및 간격)에 따른 자계검출 특성 변화는 기존 연구자들에 의해 보고 되어 있지 않다. 특히 코어 측면 폭은 센서 크기를 줄이는데 걸림돌로 작용하는 인자이며, 코어 간격(gap)은 센서 상용화에 초미세 권선 기계를 사용할 경우에 중요한 인자로 작용한다. 이에 본 논문에서는 코어 형상에 대한 자계 검출특성을 알아보고, 이를 통해 새로운 구조의 플럭스게이트 센서 제작 시, 코어 형상에 대한 방향과 마이크로머시닝 제작 방법을 제시하였다.

2. 설계 및 구조

플럭스게이트 센서의 설계/제작에 있어서 차동 여자형 플럭스게이트 센서의 기본구조를 이용하였다. 이 구조는 고투자율의 연자성체 코어와 미소 선폭(pitch)의 여자 및 검출코일을 사용함으로써, 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 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[9].

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

여기서, N 은 검출코일의 감은 횟수, A 는 연자성

코어의 단면적, μ_{eff} 는 연자성 코어의 실효 투자율(effective permeability), f_{exc} 는 여자 주파수, H_s 는 연자성 코어의 포화자장, H_m 는 최대 여자자장을 의미한다. 이식에서 볼 수 있듯이, $H_m=2H_s$ 의 경우에 최대의 감도를 얻을 수 있다.

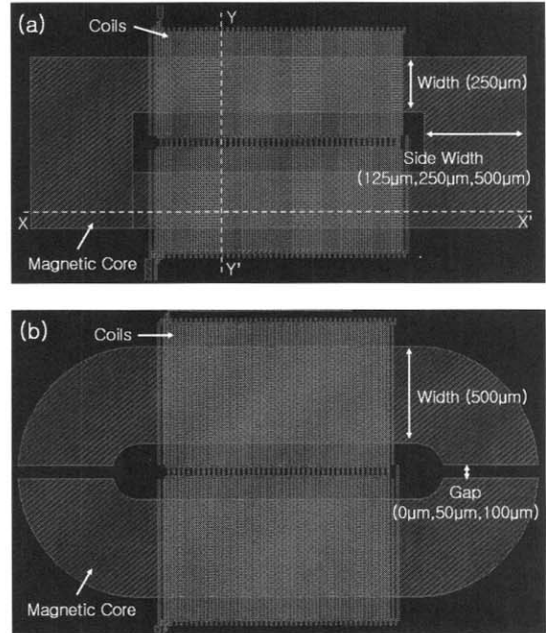


그림 1. 마이크로머시닝 공정을 이용한 차동형 플럭스게이트 센서의 설계 구조도.

Fig. 1. New structure of the differential fluxgate sensor fabricated using micro machining technology.

그림 1은 마이크로머시닝 방법을 이용하여 제작된 플럭스게이트 센서의 설계 구조도이며, 그림 1(a)에서는 자성체 코어의 측면을 센서가 동작하는 영역의 코어 폭(250 μm)의 1/2배(125 μm), 1배(250 μm), 2배(500 μm)로 구성하여, 코어 측면 폭에 대한 검출 특성의 의존성을 관찰했다. 그림 1(b)에서는 코어 간격에 대한 영향을 알아보기 위해, 코어 간격을 0 μm, 50 μm, 100 μm으로 구성하여 설계하였으며, 이때 자성체 코어의 폭은 500 μm로 하였다. 코어의 재료로는 ~1300의 높은 투자율을 갖는 퍼멀로이(permalloy, Ni_{0.8}Fe_{0.2})를 사용하였으며, 코일의 재료로는 전력소모를 줄이기 위해 전기전도도가 좋은 구리(Cu)를 사용하였다.

3. 실험

그림 2는 마이크로 플럭스게이트 자기 센서를 제작하기 위한 그림 1(a)의 X-X', Y-Y' 단면에 대한 제작 공정을 나타내고 있으며, 센서를 제작하기 위한 기판으로서 실리콘을 사용하였다. 실리콘 기판 상에 1.0 μm 의 두께로 산화막을 형성하였으며, 전기도금을 위한 seed layer로써 Ti(300 Å) / Cu(1500 Å)를 DC sputtering 방법으로 형성하였다. 하부 코일의 형성을 위해 전기도금 방법을 이용하였고, 코일 패턴 형성 후, 절연을 위하여 코일 패턴 사이에 있는 Ti(300 Å) / Cu(1500 Å)를 IBE(Ion Beam Etching)를 이용해 제거했다. 하부 코일과 자성체 코어의 사이에 절연성 및 평탄화도가 좋은 benzocyclobutane (BCB)를 이용하여 절연과 평탄화를 하였다. 이 BCB 절연층 위에 퍼멀로이 seed layer를 RF 스퍼터링 방법으로 증착시킨 후, 포토리지스트 (AZ4260)를 이용하여 패턴을 형성하고 도금하였다. 자성체 코어의 상부에 형성될 상부 코일의 절연을 위하여 BCB 절연층을 도포한 후, 하

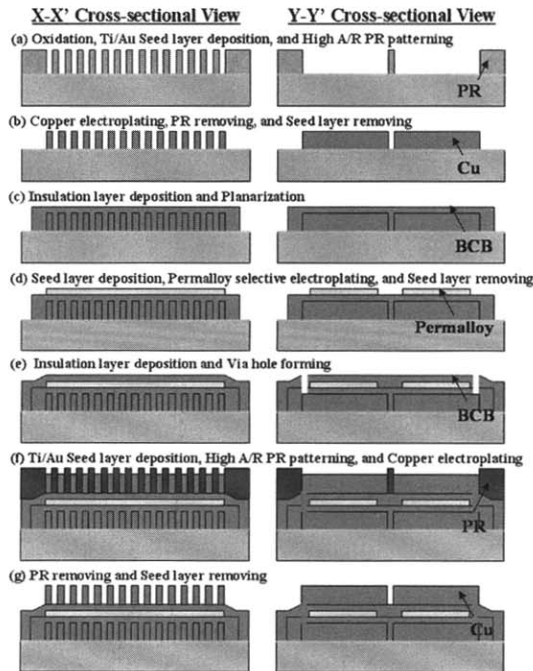


그림 2. MEMS 기술을 이용한 마이크로 플럭스게이트 자기센서의 제작 공정도.

Fig. 2. Process flow chart of MEMS-based micro fluxgate magnetic sensor.

부 코일과 상부 코일의 전기적 연결과 함께 솔레노이드 형태로 코일을 형성하기 위해 절연층을 RIE 에칭하여 through hole을 형성하였다. 형성된 through hole을 통하여 하부코일과 상부코일을 연결시킬 수 있으며, 이로 인해 솔레노이드 구조의 코일을 형성하였다. 상부 코일의 제작 방법은 하부 코일과 동일한 방법을 사용하였으며, 상부 코일 형성 후, 코일을 보호하기 위하여 절연막을 도포하였다. 보호막을 형성한 후 시편에 전기 신호를 인가하기 위한 pad를 형성하였다.

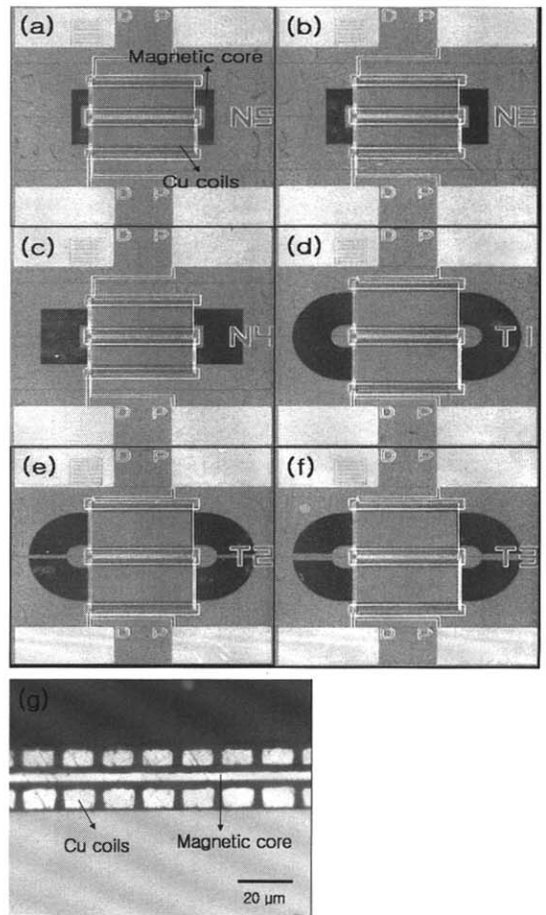


그림 3. 제작된 마이크로 플럭스게이트 자기 센서의 (a)~(f) 평면 광학 현미경 사진과 (g) 단면 광학 현미경 사진.

Fig. 3. (a) Microscope top view and (b) microscope cross-sectional view of a fabricated micro fluxgate magnetic sensor.

그림 3은 마이크로머시닝 기술로 제작되어진 마이크로 플럭스게이트 자기 센서의 광학현미경 평면 및 단면 사진을 보여주고 있다. 그림 3(a), (b), (c)는 코어 측면 폭이 각각 센서가 동작하는 영역의 코어 폭(250 μm)의 1/2배(125 μm), 1배(250 μm), 2배(500 μm)로 제작되었으며, 그림 3(d), (e), (f)는 코어 간격이 각각 0 μm , 50 μm , 100 μm 로 제작된 플럭스게이트 센서를 보여 주고 있다. 그림 3(d)에서처럼 코어 폭 500 μm 의 racetrack shaped core를 갖는 센서의 크기는 $3.0 \times 1.7 \text{ mm}^2$ 로 매우 작았다. 그림 3(g)에서 보여주는 것처럼 코일 간격(pitch)은 14 μm 이며, 코일 두께는 6 μm 으로 두껍게 도금되어 전기저항 및 소비전력을 감소시켰다. 이런 코일 구조는 여자 코일과 검출 코일이 번갈아 형성된 것으로 실제 센서 기능상의 여자코일끼리 (혹은 검출코일끼리) 간격(pitch)은 28 μm 이다. 또한 절연층이 평탄하게 형성되어져 있음을 볼 수 있으며, 자성체 코어는 약 3 μm 의 두께로 균일하게 형성되었다.

마이크로 플럭스게이트 자기 센서의 특성 측정을 위하여 여자코일에 function generator(HP33120A)를 사용하여 전류를 인가하였고, 실험을 위하여 특수 제작되어진 magnetic shield system에 DC power supply(Agilent E3642A)로 전류를 인가하여 원하는 자기장을 형성하여 센서에 자기장을 변화시키며 측정하였다. 또한 마이크로 플럭스게이트 자기 센서의 검출코일로부터 출력되어지는 제 2고조파 신호를 검출하기 위해 spectrum analyzer(Agilent 4395A)를 이용하였으며, 상기의 계측기들은 GPIB Interface를 통하여 컴퓨터로 제어하며 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

마이크로머시닝 공정으로 제작된 마이크로 플럭스게이트 자기 센서는 여자코일 49턴과 검출코일 46턴으로 솔레노이드 형태의 코일을 형성하였다. 또한 자기 플럭스의 누설을 줄이기 위해, 차동형 플럭스게이트 자기 센서에 필요한 두개의 자성체 코어를 서로 연결하여 폐자로(closed magnetic path)를 구현하였다. 도금으로 형성된 연자성체 퍼멀로이 코어는 1300의 높은 투자율과 0.1Oe의 매우 작은 coercive field를 보였다.

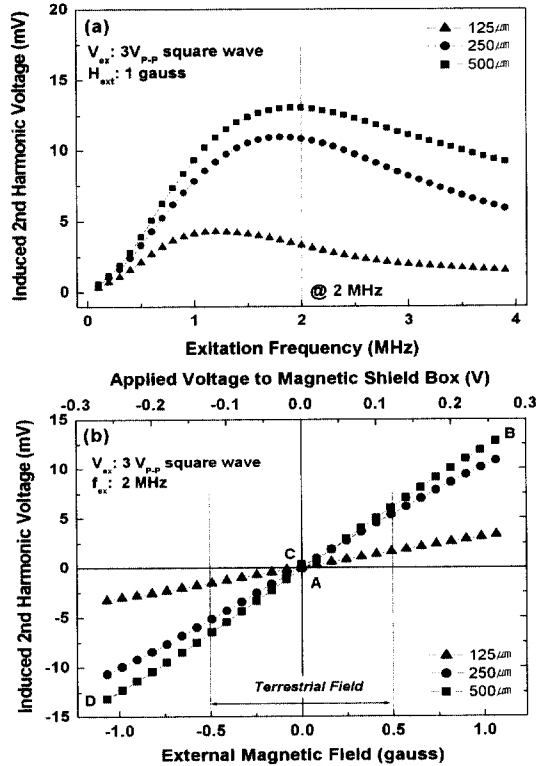


그림 4. 연자성 코어의 측면 폭(side width) 변화에 따른 제 2고조파 전압의 (a) 여자주파수 의존성 및 (b) 선형특성.

Fig. 4. (a) The dependence of 2nd harmonic voltage on excitation frequency and (b) linear characterization with magnetic core side width.

그림 4는 연자성 코어의 측면 폭(side width) 변화에 따른 제 2고조파 전압의 (a) 여자주파수 의존성 및 (b) 선형특성을 보여주고 있다. 센서의 동작을 위해 3V_{P-P} 구형파를 여자코일에 인가하였다. 그림 4(a)에서 보여주는 것처럼 코어 측면 폭이 센서가 동작하는 영역의 코어 폭(250 μm)의 1/2배(125 μm), 1배(250 μm), 2배(500 μm)로 증가할수록 제 2고조파 전압이 증가함을 알 수 있으며, 이는 측면 폭이 증가할수록 자기 플럭스가 코어의 측면을 통과할 때 발생하는 플럭스 누설이 감소하기 때문이다. 또한 센서가 동작하는 영역 코어 폭(250 μm)의 1배(250 μm)를 기준으로 그 증가하는 경향이 완화된 것을 관찰할 수 있는데, 이는 코어의 측면 폭이 센서 소형화 설계에 있어서 중요

한 인자로 작용하고 있기 때문에 센서가 동작하는 영역의 자성체 코어 폭과 동일한 측면 폭으로 설계해야 자기 센서의 검출 특성 저하를 방지할 수 있음을 알 수 있다. 250 μm 와 500 μm 의 측면 폭을 갖는 센서에서는 2 MHz에서 각각 약 10 mV와 13 mV의 제2고조파 최대 전압을 보였다. 그림 4(b)의 외부자계에 대한 제2고조파의 선형특성 관찰은 외부자계 인가는 A-B-C-D-A순으로 이루어졌으며, 외부자계에 따른 이력현상은 거의 없었다. 센서가 동작하는 영역의 폭(250 μm)의 1/2배(125 μm), 1배(250 μm), 2배(500 μm)의 모든 플럭스게이트 자기 센서에서, -1G~+1G의 넓은 외부자계 영역에서도 좋은 선형특성을 보였다.

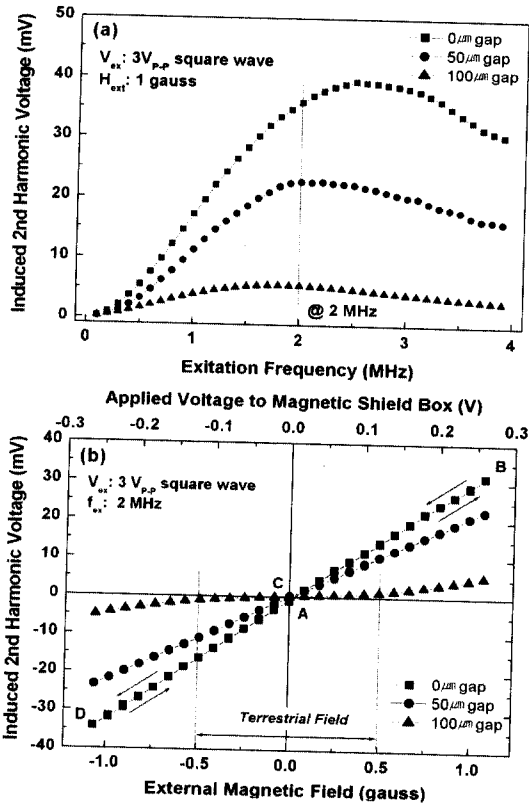


그림 5. 연자성 코어 간격(gap) 변화에 따른 제2고조파 전압의 (a) 여자주파수 의존성 및 (b) 선형특성.
Fig. 5. (a) The dependence of 2nd harmonic voltage on excitation frequency and (b) linear characterization with magnetic core gap.

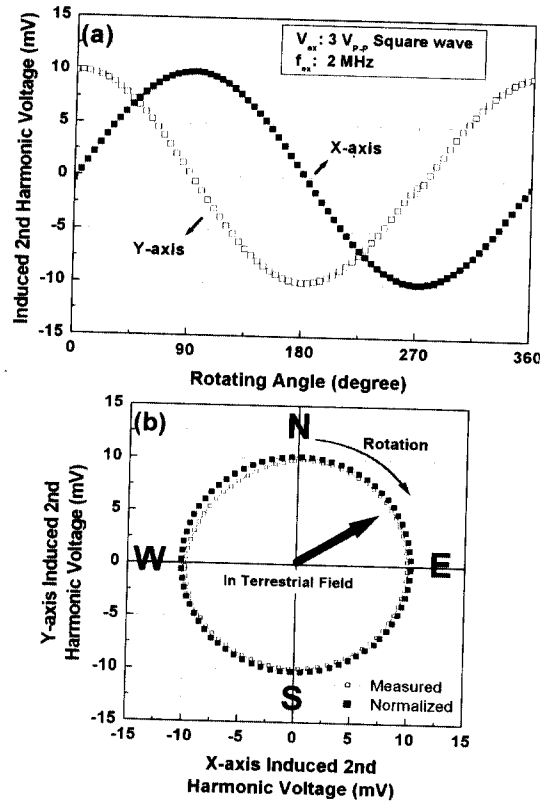


그림 6. (a) X축과 Y축 플럭스게이트 자기 센서의 회전각 변화에 따른 제2고조파 전압 변화와 (b) X-Y plot.
Fig. 6. (a) The 2nd harmonic voltage of X- and Y-axis fluxgate magnetic sensors with rotating angle and (b) X-Y plot.

그림 5는 연자성 코어 간격(gap) 변화에 따른 제2고조파 전압의 (a) 여자주파수 의존성 및 (b) 선형특성을 보여주고 있다. 연자성 코어 간격은 초미세 권선 기계로 플럭스게이트 자기센서를 제작 시 불가피하게 발생하게 되기 때문에 이의 변화 특성을 관찰하는 것은 매우 중요하다. 식 (1)으로부터 예상했던 것처럼, 코어의 gap의 크기가 증가하면 플럭스 누설이 증가하기 때문에, 제2고조파 전압이 감소함을 보이고 있다. 그러나 50 μm 의 미세한 코어 간격을 갖는 자기 센서에서는 특성이 크게 저하되지 않고, 2 MHz의 여자주파수 인가 시에 약 22 mV의 제2고조파 전압을 보이고 있다. 또한 코어 간격이 없는 자기센서의 경우엔 2.5 MHz의 여자 주파수 인가 시에 약 39.5 mV의 매

우 큰 제 2고조파 전압을 보여주고 있으며, 이런 결과는 동일한 크기의 rectangular-ring shaped core를 갖는 센서보다도 우수한 특성이며, 이는 racetrack shaped core에 의한 자기 플럭스 누설 감소 효과에 의한 것으로 예상된다[14]. 또한 그림 5(b)의 선형특성 측정을 위해 외부자계 인가는 A-B-C-D-A순으로 이루어졌다. 그림에서 보여주는 것처럼, 코어 간격이 없는 경우엔, $-1G \sim +1G$ 의 넓은 외부자계 영역에서 ~ 350 V/T의 고감도와 우수한 선형특성을 보였고, 소비전력은 ~ 14 mW였다. 코어 간격이 $100 \mu\text{m}$ 으로 크게 증가할 경우에 외부자계에 대한 제2고조파 전압의 선형성이 매우 감소하였으나, $50 \mu\text{m}$ 일 경우엔, 비교적 좋은 감도와 우수한 선형특성을 유지하였다.

그림 5(b)에서 고감도를 갖는 코어 간격이 없고, racetrack shaped core를 갖는 플럭스게이트 자기 센서를 X, Y축으로 수직 배열하고, 지구 자계에 노출시켜 360도 회전시키면서 각각 센서로부터 얻어지는 제 2고조파 전압을 관찰한 결과는 그림 6(a)에서 보여준다. 그림에서 보여주는 것처럼, X, Y축으로부터 얻어진 제 2고조파 출력 전압은 각각 sine, cosine 파형을 보여주고 있으며 제 2고조파 전압의 최대값은 약 10 mV이다. 이런 파형을 X, Y plot을 하면, 그림 6(b)에서와 같은 compass기능을 할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

5. 결론

Micromachining 공정을 이용하여 racetrack shaped core를 갖는 초소형 플럭스게이트 센서(micro fluxgate sensor)를 설계, 제작하였으며, 코어 측면 폭(side width)과 간격(gap)에 따른 특성 변화도 관찰하였다. 코어 측면 폭은 센서가 동작하는 영역의 코어 폭보다 클 경우에, 급격한 특성 저하를 방지할 수 있었고, $50 \mu\text{m}$ 의 코어 간격을 갖는 센서에서는 $100 \mu\text{m}$ 의 코어 간격을 갖는 센서에 비해 우수한 제 2고조파 출력 전압과 선형특성을 보여 주었다. 특히 코어 간격이 없는 racetrack shaped core를 갖는 센서는 $3.0 \times 1.7 \text{ mm}^2$ 의 미소 크기에도 불구하고, ~ 350 V/T의 고감도와 우수한 선형 특성을 지니며, ~ 14 mW의 소비전력을 보였다. 이런 2개의 센서를 이용하여 X, Y축 제 2고조파 전압을 측정할 결과 우수한 compass기능을 할 수 있음을 알 수 있었고, 향후 이런 초소형, 저전

력, 고감도의 자기 센서는 절대방향 정보를 요구하는 휴대용 navigation 시스템, telematics, VR 게임기 등 다양한 응용분야에 적용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 한국과학재단의 지역대학 우수과학자 육성지원 사업 (R05-2003-000-11351-0)으로 연구 되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] H. Thomas, "Direction responsive system", US Patent, No. 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. 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 the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 14, No. 5, p. 16, 2001.
- [7] Kyoung-Won Na, Hae-Seok Park, Dong-Sik Shim, Won-Youl Choi, Jun-Sik Hwang, and Sang-On Choi, "MEMS-based micro fluxgate sensor using solenoid excitation and pick-up coils", Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Materials Engineers, Vol. 16, No. 2, p. 120, 2003.
- [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, U. Wende, "A miniaturized magnetic field sensor system consisting of a planar fluxgate sensor and a CMOS readout circuitry", *Transducers95, Eurosens IX*, p. 229, 1995.
- [11] 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, 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] J.-S. Hwang, H.-S. Park, D.-S. Shim, K.-W. Na, W.-Y. Choi, and S.-O. Choi, "Electronic Compass Using Two-axis Micro Fluxgate Sensing Element", *Proceedings of the Transducers'03*, June 2003.