

논문 99-8-6-01

페라이트 링 코어를 사용한 fluxgate 센서의 구현

박용우*, 김기욱*, 김남호**, 류지구*

Implementation of a Fluxgate Sensor using Ferrite Ring Core

Yong-Woo Park*, Ki-Uk Kim*, Nam-Ho Kim**, Ji-Goo Ryu*

요 약

본 논문은 페라이트 코어, 여자코일과 픽업코일로 구성된 1축 fluxgate 마그네틱 센서를 제안하였다. 본 마그네토미터는 검출소자, 여자코일을 위한 드라이브 회로, 픽업코일 출력으로부터 DC 자장에 비례한 제 2고조파 성분 검출을 위한 신호처리 회로로 구성하여 회로를 설계하고 제작하였다. 코어는 82회의 여자코일을 통해 구형파전압으로 여자하였다. 픽업 코일(150 회)의 제 2고조파 출력은 FFT 스펙트럼 분석기로 측정하였으며, 그 결과를 제 2고조파 성분 검출을 위한 PSD(phase sensitive detector)단의 출력과 비교하였다. 감도는 구동주파수 2 [kHz]에서 약 50 [V/T]의 결과를 얻었으며, fluxgate 마그네틱 센서의 비선형계수는 약 2.0% 정도였다.

Abstract

In this paper, we have presented an one-axis fluxgate magnetic sensor with ferrite core, excitation, and pick-up coil. This magnetometer is consist of a sensing element, driving circuits for excitation coil and signal processing for detecting second harmonic frequency component which is proportional to the DC magnetic to be measured. The sensor core is excited by a square waveform of voltage through 82 turns of the excitation coil. The second harmonic output of pick-up coil(150 turns) is measured by a FFT spectrum analyzer. This result is compared to output of PSD(phase sensitive detector) unit for detecting a second harmonic component. The measured sensitivity is about 50 V/T at driving frequency of 2 kHz. The nonlinearity of fluxgate magnetic sensor is calculated about 2.0%.

1. 서 론

최근 fluxgate 센서 시스템(sensor system)은 자장(magnetic field)의 측정에 있어서 중요하게 사용되고 있으며, 특히 지자장 측정, 광물탐사, 우주탐사 및 해저탐사 등에 사용되고 있다.^[1,2]

fluxgate 센서는 자장세기의 시간에 대한 미분으로 출력하는 유도코일 센서와는 달리, 자장내부에서 다른 두 위치 사이의 자장차이 및 주위의 자장세기를 측정하는 것이다. 그 검출범위는 약 $10^{-1} \sim 10^6$ [nT]이며, 분해능은 약 10^{-1} [nT]로 알려져 있다. 이 센서는 비교적 염가인 자기저항소자와 홀(Hall)센서에 비해 분해능이 상당히 높고, 양자효과를 이용한 SQUID와 같은 고정밀도센서 보다는 분해능이 다소 낮다.^[3]

Fluxgate 센서의 기본적 원리는 1940년 이후 비교적 일찍 알려져 왔으나, 이들 센서의 개발은 1950년 초기

* 부경대학교 전자공학과 (Dept. of Electronics Eng., Pukyong National Univ.)

** 부경대학교 제어측정공학과 (Dept. of Control and Instrumentation Eng., Pukyong National Univ.)

<접수일자 : 1999년 7월 23일>

부터 기술적 도입이 가능하게 되었다.

Fluxgate 센서의 형태는 단일선형구조, 두개의 평형 구조 및 링 코어구조로 되어있으며, 이들 중 링 코어 fluxgate 센서는 두개의 평형 코어구조를 갖는 검출성분의 정합문제를 피할 수 있으므로 2축 자장 검출에 많이 사용되고 있다.^[4,5]

현재 사용되고 있는 fluxgate 마그네틱 센서는 제 2고조파 검출방법을 사용하고 있으며 고감도, 안정성, 신뢰성, 경제성 및 저잡음특성을 갖고 있는 것이 장점으로 알려져 있다. 그러나 상대적으로 선형오차가 크므로 이를 감소시키기 위한 부가적인 신호처리회로가 필요하며, 또한 제 2고조파만을 통과시키는 대역통과 필터를 사용해야 하므로 회로가 복잡해지는 단점이 있다.^[6,7] 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 우주탐사, 차량 및 항해용 항법장치, 해저탐사 등 지자장 이하의 자장 검출이 가능한 고성능 fluxgate 자기컴파스 연구, 개발을 위한 기초연구로서 페라이트 링코어를 사용한 1축 fluxgate 센서를 제작하였다. 또한 제 2고조파를 검출하는 방법을 사용한 fluxgate 센서의 신호처리회로의 복잡성을 줄이기 위해, PSD(phase sensitive detector)회로와 적분기를 사용한 회로를 설계, 제작하여 간소화 하였다.

설계, 제작된 페라이트 링 코어 fluxgate 센서의 성능을 평가하기 위하여, 제 2고조파 출력을 FFT 스펙트럼 분석기로 측정한 결과와 제안된 신호처리회로를 이용한 출력을 비교, 분석하였다.

II. Fluxgate 센서의 원리

1. 센서의 구조

그림 1은 링 코어형 fluxgate 센서구조를 나타낸 것이다. 이 센서는 링 코어에 코일을 감아 링 코어의 내부에 자장을 발생시키도록 하였으며, 이 코일을 여자코일 또는 선자화 코일이라고 부른다. 여자코일은 링 코어 주위에 밀착하여 균일하게 감는다. 그리고 외부 자장에 대한 출력전압을 유지시키기 위해 링 코어 위에 pick-up 코일을 감았으며, 이 pick-up 코일의 유기전압 $v_x(t)$ 는 코어 내부자속밀도의 변화에 따라 유기된다. pick-up 코일의 유기전압 $v_x(t)$ 는 코어의 두개의 영역(y축을 기준으로 왼쪽과 오른쪽)을 통해 자속이 시간적으로 변화하기 때문에 하나의 성분으로 구성된다. 즉,

pick-up 코일을 통해 지나가는 자속은 (-)x축의 $B_y^-(t)$ 와 (+)x 축의 $B_y^+(t)$ 로 구성되고 있다. 외부자장이 없을 경우 $B_y^-(t)$ 와 $B_y^+(t)$ 의 크기가 같기 위해서는 코어의 단면적이 항상 일정하여야 하며 pick-up 코일도 균일하게 감겨져야 하고, 코일의 중심이 링 코어의 정중앙을 지나도록 할 필요가 있다.

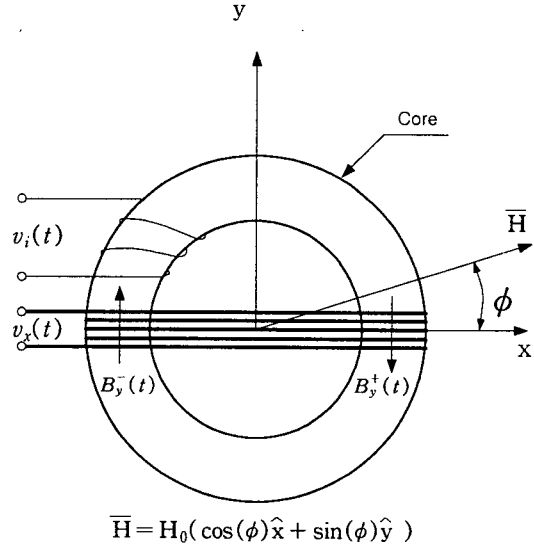


그림 1. 링 코어 fluxgate센서의 구조

Fig. 1. Top view of a ring core fluxgate sensor.

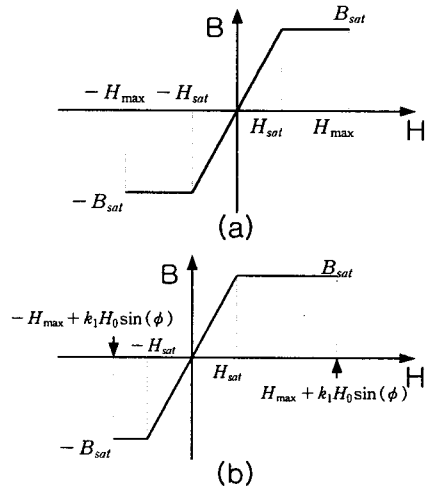


그림 2. (a) 외부자장이 없을 경우 B-H 곡선,

(b) 외부자장이 있을 경우 B-H 곡선

Fig. 2. (a) B-H curve without external bias field,

(b) B-H curve with external bias field.

그림 2는 외부 자장이 없을 경우와 외부자장이 있을 경우의 링 코어의 이상적인 B-H 곡선이다. 그림에서와 같이 외부 자장이 없을 경우 B-H 곡선은 대칭적이 되며, 외부자장이 있을 경우는 비대칭인 곡선을 나타낸다. H_{max} 는 시간에 따라 변화하는 자장의 최대값이며, H_{sat} 은 포화자속밀도 B_{sat} 에 해당하는 자장의 세기이다.

그림 3은 외부자장이 없을 경우(실선)와 외부자장이 있을 경우(점선) x축 방향 pick-up 코일에 대한 입출력 파형을 나타낸 것이다.

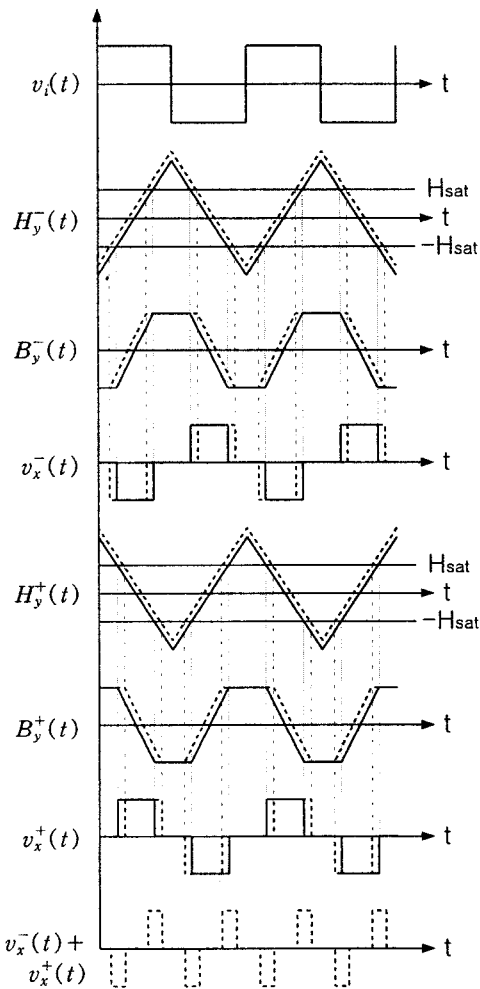


그림 3. 외부자장이 있을 경우와 없을 경우 pick-up 코일에 대한 입출력사이의 파형.

Fig. 3. Waveforms between input and output for the pick-up coil with and without external bias field.

2. 외부자장이 없는 경우의 동작

그림 3에서 외부자장이 없을 때 자화자장 $H_y(t)$ 가 한주기 동안 변화할 때 코어는 각 반주기동안 같은 시간만큼 포화된다. 코어가 포화되면 $H_y(t)$ 에 무관하게 자속밀도 $B_y(t)$ 는 항상 일정한 값을 가진다. 여기서 자화자장 $H_y(t)$ 파형은 그림 3과 같이 구동전압이 구형파로 인가되고 코어의 자기이력특성을 무시한 경우 일 때 나타낸 이상적인 그림이다. 그리고 자속밀도 $B_y(t)$ 는 포화이전에는 자화자장 $H_y(t)$ 에 비례하는 특성을 나타낸다. Pick-up 코일을 통과하는 총 자속은 코일의 각 면으로부터 얻어진다. 그러므로 pick-up 코일의 한 면으로부터 $B_y^-(t)$ 는 식 (1)과 같이 된다.

$$B_y^-(t) = -\frac{4\mu H_{max}}{\pi^2} \sum_{n=odd} \frac{1}{n^2} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(n\pi \frac{H_{sat}}{H_{max}}\right) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \quad (1)$$

$B_y^-(t)$ 에 의한 출력전압은 식 (2)와 같이 된다. 여기서, A는 단면적, N은 권수이다.

$$v_x^-(t) = -NA \frac{dB_y^-(t)}{dt} = -\frac{8\mu NAH_{max}}{\pi T} \sum_{n=odd} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(n\pi \frac{H_{sat}}{H_{max}}\right) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \quad (2)$$

$B_y^+(t)$ 에 의한 출력전압은 유사한 방법으로 식 (3)과 같이 된다.

$$v_x^+(t) = \frac{8\mu NAH_{max}}{\pi T} \sum_{n=odd} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(n\pi \frac{H_{sat}}{H_{max}}\right) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \quad (3)$$

그러므로, pick-up 코일의 총 유기전압은 코어 양쪽의 출력전압의 합으로 식 (4)와 같이 된다.

$$v_x(t) = v_x^-(t) + v_x^+(t) = 0 \quad (4)$$

따라서, 외부자장이 없을 경우 pick-up 코일의 이상적인 출력전압은 0 [V]이다.

3. 외부자장이 있는 경우의 동작

Fluxgate 센서에 외부 자장이 인가된다면 그림 2의 (b)와 같은 B-H 곡선이 적용된다.

외부자장 $k_1 H_0 \sin(\phi)$ 때문에 각 반주기 동안에 있어, 한쪽은 $-H_{\max} + k_1 H_0 \sin(\phi)$ 의 시간동안, 다른 한쪽은 $H_{\max} + k_1 H_0 \sin(\phi)$ 의 시간동안 포화되어 포화 시간이 다르다. 여기서 계수 k_1 은 외부자장의 세기와 코어 내부의 자장세기에 대한 관계를 나타내며 k_1 은 1보다 작은 값이다. pick-up 코일을 통과하는 총자속은 각 면에서의 합이므로 식 (5)와 같다.

$$B_y(t) = -\frac{16\mu H_{\max}}{\pi^2} \cdot \sum_{n=\text{even}}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\left(1 - \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi k_1 H_0 \sin(\phi)}{2H_{\max}}\right) \cos\left(\frac{2n\pi}{T} t\right) \quad (5)$$

그리고, 출력 전압은 식 (6)과 같이 된다.

$$v_x(t) = -\frac{32\mu N A H_{\max}}{\pi T} \cdot \sum_{n=\text{even}}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2} \cdot \left(1 - \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2} \frac{k_1 H_0 \sin(\phi)}{H_{\max}}\right) \cdot \sin\left(\frac{2n\pi}{T} t\right) \quad (6)$$

식 (6)에서 출력전압의 기본 성분은 기본 여자 주파수의 2배임을 알 수 있다. 출력전압이 제 2고조파 성분만을 통과시키는 대역통과 필터를 통과했다면 식 (7)과 같이 된다.

$$v_x(t) = \frac{16\mu N A H_{\max}}{\pi T} \sin\left(\pi \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right) \cdot \sin\left(\pi \frac{k_1 H_0 \sin(\phi)}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (7)$$

식 (7)의 진폭은 코어의 양면을 둘러싸는 fluxgate 코일로부터 자기변조 출력진폭의 2배이다. $k_1 H_0$ 의 양이 H_{\max} 에 비해 매우 작다면 식 (8)와 같다.

$$v_x(t) = k_2 H_0 \sin(\phi) \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (8)$$

III. Fluxgate 센서 제작 및 측정

1. 여자코일과 pick-up 코일의 제작

코어의 비투자율은 자장의 변화에 따른 자속밀도의 변화의 비로서 이것은 미약한 자장의 변화에 대해 얼마나 많은 자속밀도의 변화가 있는가를 나타낸다. 그러므로 fluxgate 센서는 비투자율이 크고 보자력이 작은 코어를 일반적으로 사용한다.

실험에 사용된 fluxgate 센서는 표 1의 사양을 갖는 링 코어를 사용하였다. 그리고 여자코일은 코어에 단면적이 0.25 [mm²]인 코일로 균일하게 82회를 감았으며, pick-up용 코일은 그림 1의 구조와 같이 150회를 감았다.

표 1. 페라이트 코어의 특성

Table 1. The properties of ferrite core.

외경 [mm]	내경 [mm]	두께 [mm]	μ_i	B_{sat} [G]	B_r [G]	H_{max} [Oe]
20.0	14.5	7.5	5750	4800	500	5

그림 4는 본실험에 사용된 페라이트 코어의 자기이력곡선이다. 보자력 H_c 는 비교적 작은 값을 나타내고 있으며, 자기포화는 H 가 약 5.0 [Oe]부근에서 일어나며 잔류자속밀도 B_r 은 약 500 [G]였다. 이러한 자기이력특성은 그림 2에서와 같이 근사적으로 선형구간 함수로 표현될 수 있음을 알 수 있다.

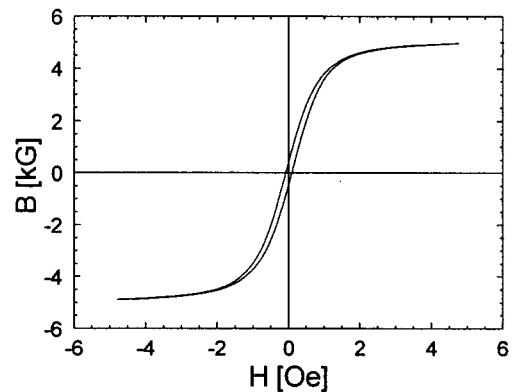


그림 4. 자기이력곡선

Fig. 4. Hysteresis curve.

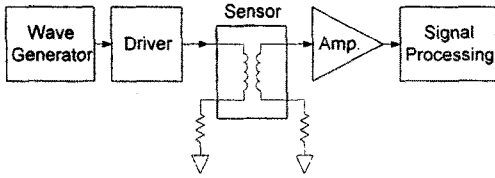
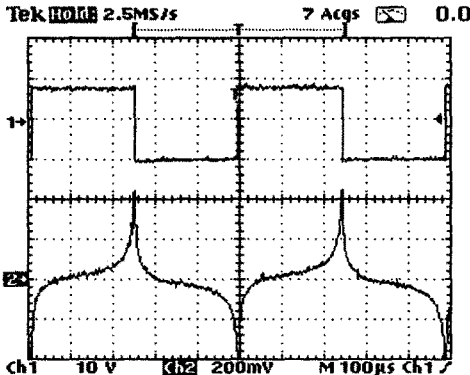
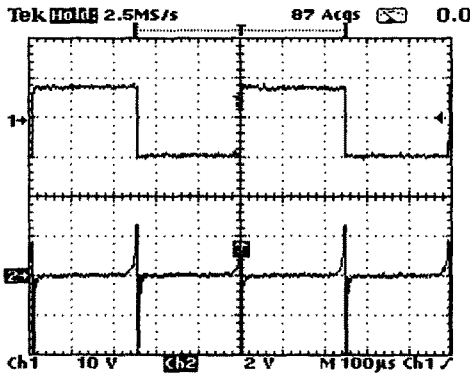


그림 5. 시스템의 블록도
Fig. 5. Block diagram of the system.



(a)



(b)

그림 6. (a) 여자코일의 구동전압과 전류
(b) 여자코일의 구동전압과 픽업코일의 전압
Fig. 6 (a) Drive voltage and current wave form of the excitation coil, (b) Drive voltage of the excitation coil and voltage waveform of the pick-up coil.

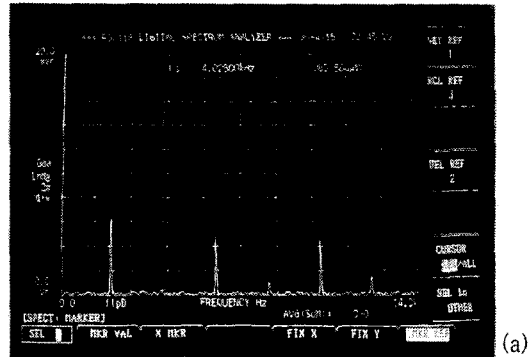
2. 여자코일의 구동 및 검출회로

여자코일의 구동회로 및 검출회로의 블록도를 그림 5에 나타내었다. 파형발생부(구형파)는 RC발진회로를 사용하였으며, 주파수 가변범위는 수 [Hz]에서 10 [kHz]까지 가변 될 수 있도록 설계, 제작하였다. 또한

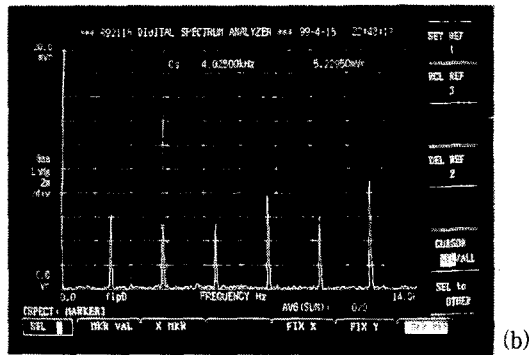
pick-up 코일에 유기되는 전압이 미약하므로 전치증폭기를 사용하였으며. 신호처리부는 증폭된 신호를 기존 신호의 2배가 되는 주파수로 동기정류 하였다.

그림 6은 여자전압 파형과 전류 파형 그리고 여자전압과 pick-up 코일의 전압 파형을 나타낸 것이다. 이 그림에서 여자전류 I_{exc} 파형은 자화자장 $B_y(t)$ 의 파형과 동일하게 나타나지 않고 있다. 이것은 코어의 자기이력 곡선에서 코어의 투자율이 자화자장 H 에 따라 다르기 때문이라 생각된다.

그림 7은 외부자장이 없을 경우 pick-up코일의 출력 전압 스펙트럼과 외부자장이 있을 경우의 스펙트럼을 보여 주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 외부자장이 없을 경우는 우수 고조파 성분이 미약하게 나타났으며, 이것은 offset 전압이라 생각된다. 이 offset 전압은 코어 특성의 불 균일성, pick-up 코일의 비대칭성 등에 의하여 발생하는 것으로 생각된다.^[3,8] 외부자장을 센서에 인가하게 되면 그림 7의 (b)와 같이 우수 고조파 성분의 진폭은 자장에 비례적으로 증가하지만 기수 고조파 성분은 거의 변하지 않았다.



(a)



(b)

그림 7. pick-up 코일의 스펙트럼 (a) 외부자장이 없을 경우, (b) 외부자장이 있을 경우
Fig. 7. Spectrum of pick-up coil ; (a) without external bias field, (b) with external bias field.

그림 8은 외부자장의 세기 5 [G]까지 여자전류에 따른 pick-up 코일의 제 2고조파 출력전압을 FFT 분석기로 측정된 것을 나타낸 것이다. 여자전류를 많이 흘릴수록 제 2고조파 성분의 전압은 증가하였으며, 인가자장의 세기에 거의 선형적인 특성을 보였다.

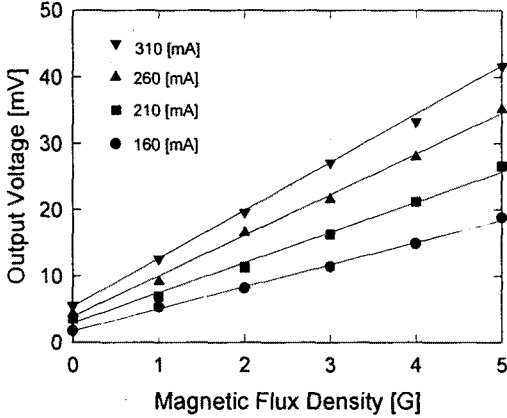


그림 8. 여자 전류에 따른 제 2고조파 전압
Fig. 8. The second harmonic voltages with the excitation current.

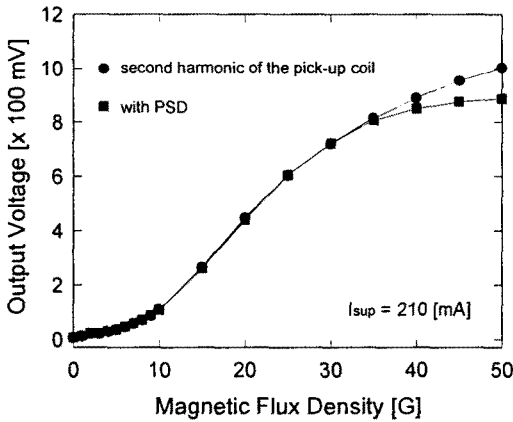


그림 9. 외부자장에 따른 출력전압(0~50 [G])
Fig. 9. Output voltages with external bias field (0~50 [G]).

그림 9는 신호처리 전단의 pick-up코일의 제 2고조파 성분의 전압과 신호처리 후의 출력전압을 비교한 그림이다. 약 35 [G]정도까지는 신호처리 전과 후가 거의 일치하였다. 그리고, 그림 10은 여자전류가 210 [mA]일 때 신호처리 전과 신호처리 후를 3 [G]까지 측정된 결과이며, 이때 다소 offset이 존재하지만, 선형성

은 비교적 양호하였다.

이러한 결과들을 고려할 때 제안된 신호처리 회로가 유효성이 있음을 알 수 있었다.

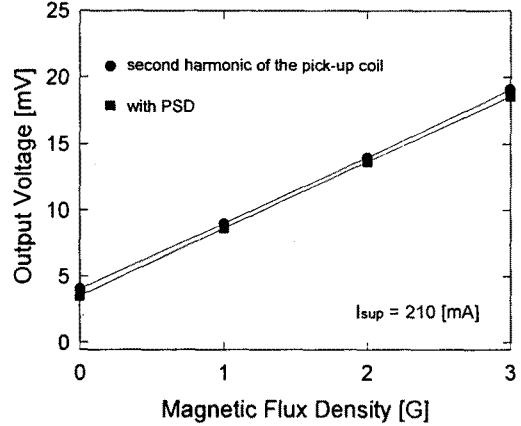


그림 10. 외부자장에 따른 출력전압(0~3 [G])
Fig. 10. Output voltages with external bias field (0~3 [G]).

IV. 결 론

제 2고조파를 검출하는 fluxgate 센서 시스템의 단점인 회로의 복잡성을 줄이기 위해서 링 코어를 이용한 1축 fluxgate 센서를 제작하고, PSD 회로로 신호처리한 fluxgate 센서의 특성을 측정하였으며, 그 결과, 외부 인가자장의 증가에 따라 pick-up 코일의 제 2고조파 출력전압은 거의 선형적으로 증가하였으며, 여자코일의 전류가 증가할수록 출력전압은 크게 나타났다. 그리고, pick-up코일의 제 2고조파 성분 출력전압과 PSD 신호처리 후의 전압을 비교하여 외부자장 35 [G]이내에서는 거의 일치함을 보였다. 특히 여자전류를 210 [mA]로 하였을 때 외부자장 3 [G]이내에서 제 2고조파의 출력전압과 PSD 처리후의 출력전압은 거의 일치하였으며, 비선형계수는 약 2.0%이므로 비교적 양호한 선형성을 보였다. 이때 감도는 50 [V/T]였다.

참 고 문 헌

[1] W. F. Stuart, "Earth's field magnetometry," Rep. Progr. Phys., 35, pp. 803-881, 1972.
[2] M. H. Acuna, "Fluxgate magnetometers for

- outer planet exploration," IEEE Trans. Magn., MAG-10, pp. 519-523, 1974.
- [3] Pavel Ripka, "Review of Fluxgate Sensor," Sensor and Actuators A, 33 pp.129-141, 1992.
- [4] M.H.Acuna and N.F.Ness, "The pioneer XI High Field Fluxgate Magnetometer, "space science Instrumentation 1, pp. 177-188, 1975.
- [5] T. J. Peters, "Automobil navigation using a magnetic flux-gate compass," IEEE Transactions on vehicular Technology, Vol. VT-35, pp. 41-47. 1986.
- [6] F. Primdahl and P. A. Jensen, "Compact spherical coil for fluxgate magnetometer system," J. phys. E. Sci. Instrum., Vol. 15, pp. 221-226, 1982.
- [7] J. Pill-Henriksen, J. M. G. Merayo, O. V. Nielsen, H. Petersen, J. Raagaard Peterson, F. Primdahl, "Digital detection and feedback fluxgate magnetometer, " Meas. Sci. Technol. 7, pp. 897-903, 1996.
- [8] J. C. Cruz, H. Trujillo and M. Rivero, "New kind of fluxgate magnetometer probe with enhanced electronic processing," Sensor and Actuators, A 71, pp. 167-171, 1998.

著 者 紹 介



박용우 (朴用禹)

1998년 2월 부경대학교 제어계측 공학과 졸업(공학사). 1998년 3월~현재 부경대학교 대학원 전자공학과 석사과정 재학. 주관심분야 : 센서시스템 및 firmware.



김기욱 (金基旭)

1975년 2월 부산동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1999년 8월 부경대학교 산업대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1975년 3월 부산덕원공업고등학교 교사. 1978년 3월 부산전자공업고등학교 교사. 1992년 3월 전자계열공동실습소 연구교사. 1994년 3월 부산학생야영원 연구사. 1995년 3월 부산광역시 교육청 장학사. 1997년 3월 부산산업학교 교감. 1998년 9월 부산전자공업고등학교 교감. 1999년 9월~현재 부산공업중학교 교장. 주관심분야 : 센서시스템.



김남호 (金南虎)

1984년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1986년 2월 영남대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1991년 8월 영남대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1992년 3월~현재 부경대학교 전기제어계측공학부 부교수. 1999년 6월~현재 한국통신학회 부산경남지부 총무이사. 주관심분야 : 신호처리, 회로 및 시스템, 계측시스템.



류지구 (柳志久)

1977년 2월 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1979년 2월 동아대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1992년 8월 영남대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1979년 3월~현재 부경대학교 전자정보통신공학부 교수. 1989년 1월~1990년 1월 일본 도요하시 기술과학대학 반도체 group 객원 연구원. 주관심분야 : 반도체 센서 및 집적화.