

논문 2002-11-2-01

2차원 Magnetic Fluxgate 센서의 구현에 관한 연구

박용우*, 김남호**, 류지구*

**A Study on the Implementation of the 2-Dimension
Magnetic Fluxgate Sensor**

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

요 약

본 연구에서는 페라이트 링 코어를 이용한 2차원 fluxgate 센서를 제안하였으며, 본 fluxgate 센서 시스템은 2차원 자장을 측정할 수 있는 센서와 그 센서를 구동하기 위한 구동회로, 그리고 신호처리회로 등으로 구성하였다. 신호 검출 방법으로는 우수고조파 성분 검출을 위해 PSD(phase sensitivity detector) 회로를 사용하였으며, 기존의 제 2고조파 검출법과 비교하기 위해서 pick-up 코일 출력전압의 제 2고조파 성분을 FFT 스펙트럼 분석기를 사용하여 측정하였고, 이렇게 측정된 제 2고조파 성분의 전압과 PSD 단의 출력전압을 비교하였다. 그 결과 여자전류의 증가에 따라 센서의 출력전압도 증가하였으며, 구동주파수에 따른 PSD 단의 출력전압은 주파수가 1.5 [kHz]일 때까지는 증가하였지만, 그 이상의 주파수에서는 감소함을 보였다. 그리고 pick-up 코일의 제 2고조파 성분의 전압은 계속 증가함을 보였다. 센서의 최대감도는 구동주파수 1.5 [kHz], 구동전류 2 [App]에서 최대값을 보였으며 감도는 약 1580 [V/T]였다. 센서의 비선형계수는 3 [G] 이내에서 제 2고조파 성분의 전압인 경우 약 1 [%]이내 였으며, PSD 단 이후는 약 2.3 [%]이내 였다. 그리고 각도오차는 약 ± 2 [%/FS]이내였다.

Abstract

We have presented a 2-dimensional fluxgate sensor with ferrite core, excitation, and pick-up coil. This fluxgate sensor system consists 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 the excitation coil of 80 turns. The second harmonic output of pick-up coil(x and y axis: 100 turns) is measured by FFT spectrum analyzer. This result is compared with output of PSD(phase sensitive detector) unit for detecting the second harmonic component. The measured maximum sensitivity is about 1580 V/T at driving frequency of 1.5 kHz and excitation current of 2 App. The nonlinearity of this system is measured about 2.3 %(PSD) and about 1 %(second harmonics of the pick-up). The angle error of the system is ± 2 %/FS.

1. 서 론

최근 센서의 기술은 고정도, 안정성, 선형성을 추구하는 방향으로 연구가 활발히 이루어지고 있다. 자장 측정에 사용되는 센서로는 홀 효과를 이용한 홀 센서, 양자화 효과를 이용한 SQUID 센서, 자화곡선의 포화영역을 이용한 fluxgate 형 센서 등 여러 종류가 있다. 이들 가운데 fluxgate 센서 시스템은 최근 자장측정을 위하여 중요하게 사용되고 있으며, 특히 지자장 측

* 부경대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Eng. Pukyung Nat'l Univ.)

** 부경대학교 제어계측공학과(Dept. of Control & Instrumentation Eng. Pukyung Nat'l Univ.)

<접수일자 : 2001년 11월 9일>

정, 광물탐사, 우주탐사 및 해저탐사를 위한 센서로서 사용되어 왔다.^(1~3)

Fluxgate 센서의 자장검출범위는 약 $10^{-1} \sim 10^6$ [nT]이며, 분해능은 10^{-1} [nT]로 알려져 있다. 이 분해능은 비교적 저렴한 자기저항센서와 홀 센서에 비하여 상당히 높으며, SQUID 센서와 같은 고가의 센서 보다는 다소 낮은 분해능을 가지고 있다.^(4~5)

Fluxgate 센서의 자장검출방법으로는 제 2고조파 검출, 펄스위치 검출, 펄스스키 검출방법 등을 사용하고 있으며, 현재 가장 많이 사용되고 있는 방법은 제 2고조파 검출방법을 사용하고 있다. 그리고 디지털 신호처리에 적합한 형태인 펄스위치 검출형태도 연구가 이루어지고 있다. 제 2고조파 검출원리를 이용한 fluxgate 센서는 제 2고조파 성분을 검출하기 위한 협대역통과 필터를 사용해야 하므로 회로가 복잡해지는 단점을 가지고 있지만 고감도, 안정성, 신뢰성이 우수하여 많이 사용되고 있다.^(5~8) 또한 fluxgate 센서는 사용되는 코어구조에 따라 단일선형 코어구조, 두 개의 평행코어 구조, 링 코어 형태로 구성되어 있다. 특히 링 코어 fluxgate 센서는 두 개의 평행코어 구조 센서가 가지는 검출성분의 정합의 어려움을 피할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 자장검출 축 방향이 코어평면에 평행한 2차원 검출응용에 이상적으로 적합한 장점이 있어 많이 사용되고 있다.^(6, 9~11)

본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 코어는 두 개의 평행 구조를 가진 센서에서 나타나는 센서정합의 문제를 해결할 수 있는 페라이트 링 코어를 사용하였다. 검출부는 제 2고조파 성분만을 검출하는 회로의 복잡성을 줄이기 위해 PSD (phase sensitivity detector) 회로와 간단한 적분기만을 사용하는 신호처리 회로를 x축과 y축 각각 독립적으로 설계, 제작하였다. 제작된 페라이트 링 코어를 이용한 2차원 fluxgate 센서의 성능을 평가하기 위해 기존의 제 2고조파 원리를 이용한 방법의 측정결과와 비교검토하였다.

II. Fluxgate 센서의 개요 및 동작원리

1. 센서의 구조

링 코어형 fluxgate 센서의 구조를 그림 1에

나타내었다. 링 코어형 fluxgate 센서는 링 코어에 코일을 감아 링 코어의 내부에 자장을 발생시키도록 되어있다. 이 코일을 여자코일이라 부른다. 여자코일은 링 코어 주위에 균일하고 단단히 감겨있으며 여자코일에 전압 $v_i(t)$ 가 인가되면 모든 자장은 링 코어의 단면적 A 를 따라 링 코어 내부를 통해 흐르게 된다. 그리고 외부 자장에 대한 출력전압을 유기시키기 위해 그림 1과 같이 링 코어 위에 코일을 감으며, 이 코일을 pick-up 코일이라 한다. 이 pick-up 코일의 유기전압 $v_x(t)$ 와 $v_y(t)$ 는 코어내부의 자속밀도 변화에 의해 유기된다. 이 유기전압은 코어의 두 개의 영역($v_x(t)$ 에 대해 y축을 기준으로 왼쪽과 오른쪽, $v_y(t)$ 에 대해 x축을 기준으로 위와 아래)을 통해 자속이 시간적으로 변화하기 때문에 하나의 성분으로 구성되어 있다.

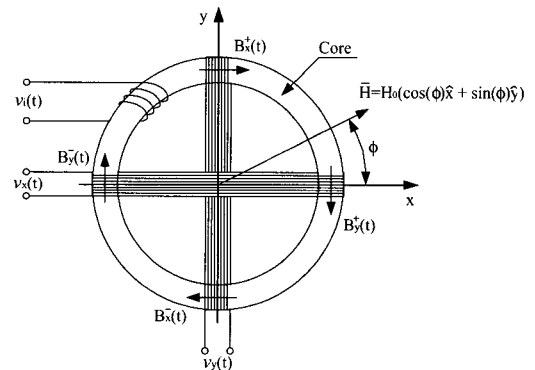


그림 1. Fluxgate 센서의 구조.

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

예를 들면, x축에 놓여있는 코일을 통해 지나가는 자속은 부의 x축을 가로지르는 $B_y^-(t)$ 요소와 양의 x축을 가로지르는 $B_y^+(t)$ 로 구성되어 있다.

Fluxgate 센서는 높은 감도를 가지고 있기 때문에 구조적인 설계에 있어서 매우 정밀하게 만들어야 한다. 특히 코어의 단면적이 일정하여야 하며 pick-up 코일이 균일하게 감겨져 있어야 한다. 그리고 pick-up 코일의 중심이 링 코어의 중앙을 지나도록 설치해야 한다. 그림 1에서 고정되어 있는 자장세기 벡터 \vec{H} 는 기준 자장이다.

2. 외부자장이 없는 상태에서 동작

그림 2는 외부자장이 없을 때의 B-H 곡선을 나타낸 것이다. 그림 2에서 곡선은 대칭적이며, H_{max} 는 시간에 따라 변하는 자장세기의 최대값이다. H_{sat} 는 포화 자속밀도(B_{sat})에 해당하는 자장의 세기이다. 그리고 자장의 세기 $H_y(t)$ 가 완전히 한 주기동안 변함에 따라 코어는 각 반주기 동안 같은 시간만큼 포화된다. 코어가 포화되면 인가된 자장의 세기에 무관하게 항상 일정한 자속밀도를 가진다. 그림 3에서 자장의 세기 $H_y(t)$ 의 파형은 구동전압(v_i)이 구형파로 인가되고, 코어의 자기이력 특성을 무시할 경우에 나타나는 이상적인 그림이다. 각 반주기동안 포화 상태에 있는 시간을 t_{sat} 라 하면 포화시간은 식 (1)과 같이 H_{max} , H_{sat} 및 주기 T 에 대한 항으로 표현된다.

$$t_{sat} = \left(1 - \frac{H_{sat}}{H_{max}}\right) \left(\frac{T}{2}\right) \quad (1)$$

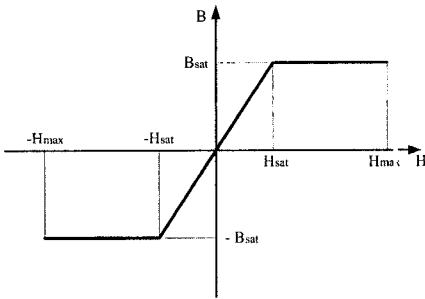


그림 2. 외부자장이 없을 때 B-H 곡선
Fig. 2. B-H curve without external bias field.

Pick-up 코일을 통과하는 총 자속은 코일의 각 면으로부터 얻어진다. Pick-up 코일에 의해 검출된 자장은 다소의 x축과의 양의 교차점에 의한 $H_y^+(t)$ 와 부의 교차점에 의한 $H_y^-(t)$ 에 해당하는 y성분의 값을 가지고 있으며, 이 성분을 제거하기 위해서는 pick-up 코일을 부의 x축과 양의 x축과의 교차점을 가지지 않도록 코일의 폭을 좁게 감아야 한다. $H_y^-(t)$ 는 식 (2)와 같이 선형구간함수로 표현된다.

$$H_y^- = \begin{cases} \frac{4H_{max}}{T} t - H_{max} , & 0 < t < \frac{T}{2} \\ -\frac{4H_{max}}{T} t + 3H_{max} , & \frac{T}{2} < t < T \end{cases} \quad (2)$$

$B_y^-(t)$ 는 식 (3)과 같이 푸리에 코사인 급수로 표현된다.

$$B_y^-(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2n\pi}{T} t\right) \quad (3)$$

여기서, a_n 은 식 (4)와 같다.

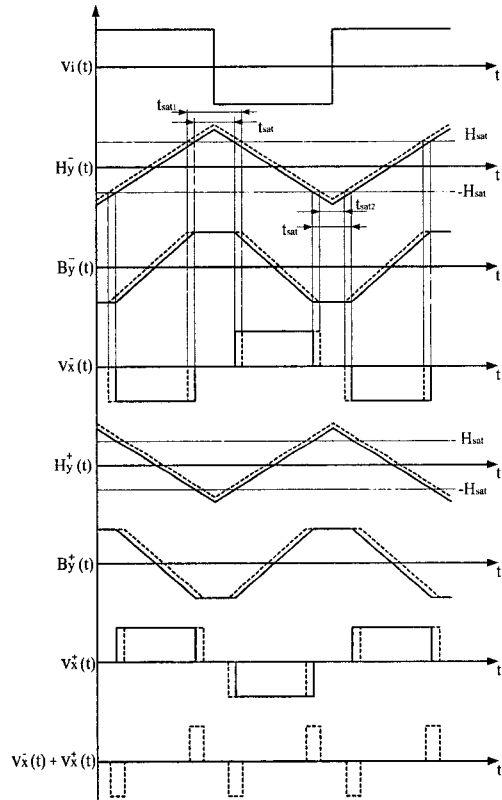


그림 3. 외부자장이 있을 때(실선)와 없을 때(점선)의 픽업 코일의 입출력관계.

Fig. 3. Input and output relations for the pick-up coil with(solid line) and without(dot line) external bias field.

$$a_n = \frac{2\mu H_{max}}{(n\pi)^2} (-1 + (-1)^n) \left[\cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{n\pi H_{sat}}{H_{max}}\right) + \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi H_{sat}}{H_{max}}\right) \right] \quad (4)$$

식 (4)에서 a_n 에 대한 이 표현에서 모든 짝수 항이 0임을 알 수 있다. 그러므로 $B_y^-(t)$ 는 식 (5)와 같이 된다.

$$B_y^-(t) = -\frac{4\mu H_{\max}}{\pi^2} \sum_{n=\text{odd}}^{\infty} \left[\frac{1}{n^2} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right. \quad (5)$$

$$\left. \sin\left(n\pi \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right]$$

$B_y^-(t)$ 에 의한 출력전압은 식 (6)과 같이 단면적 A, 권수 N 그리고 $B_y^-(t)$ 의 미분함수에 비례하므로 출력전압($v_x^-(t)$)은 식 (7)과 같이 된다.

$$v_x^-(t) = -NA \frac{dB_y^-(t)}{dt} \quad (6)$$

$$v_x^-(t) = -\frac{8\mu NAH_{\max}}{\pi T} \sum_{n=\text{odd}}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right. \quad (7)$$

$$\left. \sin\left(n\pi \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right]$$

$B_y^+(t)$ 에 의한 출력전압은 유사한 방법으로 식 (8)과 같이 유도된다.

$$v_x^+(t) = \frac{8\mu NAH_{\max}}{\pi T} \sum_{n=\text{odd}}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right. \quad (8)$$

$$\left. \sin\left(n\pi \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right]$$

그러므로 pick-up 코일의 총 유기전압은 코어 양쪽의 출력전압의 합으로 식 (9)와 같이 되고 외부자장이 없는 곳에서는 식 (7)과 식 (8)에 의해 0이 된다.

$$v_x(t) = v_x^-(t) + v_x^+(t) \quad (9)$$

3. 외부자장이 있는 상태에서 동작

Fluxgate 센서에 외부자장이 인가되면 그림 2의 B-H 곡선과 다른 모양의 B-H 곡선을 적용하게 된다. 그림 4는 pick-up 코일에 의해 둘러싸인 부분의 B-H 곡선을 보여준다. 그림 4에서 보듯이 외부자장 $k_1 H_0 \sin(\phi)$ 때문에 각 반주기 동안에 있어 한쪽은 $-H_{\max} + k_1 H_0 \sin(\phi)$ 의 시간을 다른 한쪽은 $H_{\max} + k_1 H_0 \sin(\phi)$ 의 시간이 되어 포화 시간이 다르다. 그림 4의 점선은 외부자장에 의해 변화된 입력과 출력을 보여준다.

H의 양의 반주기에 대한 포화 시간을 t_{s1} , 음의 반주기에 대한 포화 시간을 t_{s2} 라 하면 포화 시간 t_{s1} 과 t_{s2} 는 식 (10)과 식 (11)과 같이 H_{\max} , H_{sat} , T 그리고 $k_1 H_0 \sin(\phi)$ 의 항으로 표현된다.

$$t_{s1} = \left(1 + \frac{k_1 H_0 \sin(\phi)}{H_{\max}} - \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}} \right) \left(\frac{T}{2} \right) \quad (10)$$

$$t_{s2} = \left(1 - \frac{k_1 H_0 \sin(\phi)}{H_{\max}} - \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}} \right) \left(\frac{T}{2} \right) \quad (11)$$

여기서 계수 t_1 은 외부자장의 세기와 코어내부의 자장의 세기에 대한 관계를 설명하며 k_1 은 1보다 작다.

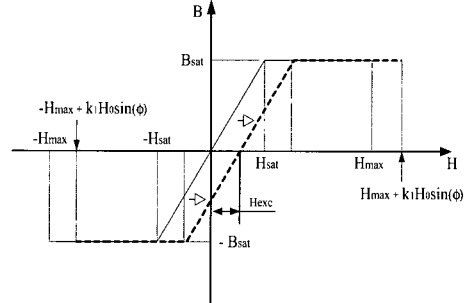


그림 4. 외부자장이 있을 때 B-H 곡선.

Fig. 4. B-H curve with external bias field.

양의 x축을 횡단하는 코어 면에서의 자장의 세기는 식 (15)와 같이 부분 연속 함수로 표현된다.

$$H_y^-(t) = \begin{cases} \frac{4H_{\max}}{T} t - H_{\max} + k_1 H_0 \sin(\phi), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ -\frac{4H_{\max}}{T} t + 3H_{\max} + k_1 H_0 \sin(\phi), & \frac{T}{2} < t < T \end{cases} \quad (12)$$

코어의 같은 면에 있어서의 자속밀도는($B_y^-(t)$)는 식 (13)과 같이 푸리에 코사인 급수로 표현된다.

$$B_y^-(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \quad (13)$$

여기서 a_n 은 다음과 같다.

$$B_y(t) = -\frac{16\mu H_{\max}}{\pi^2} \sum_{n=\text{even}}^{\infty} \left[\frac{1}{n^2} \sin\left(\frac{n\pi}{2} \left(1 - \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right)\right) \sin\left(\frac{n\pi k_1 H_0 \sin(\phi)}{2H_{\max}}\right) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right] \quad (14)$$

그러므로 출력전압은 식 (15)와 같이 된다.

$$v_x(t) = -\frac{32\mu NAH_{\max}}{\pi T} \sum_{n=\text{even}}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\left(1 - \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right)\right) \sin\left(\frac{n\pi}{2}\left(\frac{k_1 H_0 \sin(\phi)}{H_{\max}}\right)\right) \sin\left(\frac{2n\pi}{T} t\right) \right] \quad (15)$$

비슷한 방법으로 y축을 가리키는 코일에 대한 출력전압은 식 (16)과 같이 표현된다.

$$v_y(t) = -\frac{32\mu NAH_{\max}}{\pi T} \sum_{n=\text{even}}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\left(1 - \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right)\right) \sin\left(\frac{n\pi}{2}\left(\frac{k_1 H_0 \cos(\phi)}{H_{\max}}\right)\right) \sin\left(\frac{2n\pi}{T} t\right) \right] \quad (16)$$

식 (15)와 식 (16)에서 출력전압의 기본 성분은 기본 여자 주파수의 2배임을 알 수 있다. 만약 출력전압이 제 2고조파 성분만을 통과시키는 대역통과 필터를 통과했다면, 대역통과 필터 다음 단의 x축과 y축의 전압은 식 (17)과 식 (18)과 같이 된다. 식 (17)과 식 (18)의 진폭은 코어의 양면을 둘러싸는 pick-up 코일로부터 자기변조 출력진폭의 2배이다. $k_1 H_0$ 의 양이 H_{\max} 에 비해 매우 작다면 식 (20), 식 (21)과 같이 된다.

$$v_x(t) = \frac{16\mu NAH_{\max}}{\pi T} \sin\left(\pi \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right) \sin\left(\pi \frac{k_1 H_0 \sin(\phi)}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (17)$$

$$v_y(t) = \frac{16\mu NAH_{\max}}{\pi T} \sin\left(\pi \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right) \sin\left(\pi \frac{k_1 H_0 \cos(\phi)}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (18)$$

$$v_x(t) = \frac{16\mu_0 \mu_r}{T} k_1 H_0 \sin(\phi) \sin\left(\pi \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (19)$$

$$v_y(t) = \frac{16\mu_0 \mu_r}{T} k_1 H_0 \cos(\phi) \sin\left(\pi \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (20)$$

III. Fluxgate sensor 설계 및 제작

1. 여자코일과 pick-up 코일의 제작

Fluxgate 센서는 투자율이 큰 코어를 사용한다. 투자율이 큰 코어를 사용하여 미약한 자장의 변화에도 반응하도록 함으로서 센서의 감도를 증가시킨다. 센서제작에 사용된 페라이트 링 코어(H5C2 TDK 5Z22)의 자기이력곡선은 YEW magnetization curve trace를 사용하여 측정하였으며 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 실험에 사용된 페라이트 코어는 초기 투자율이 10000 ± 30 [%], 보자력 H_c 는 7.2 [A/m], 잔류자속밀도 B_r 은 900 [G], 포화자속밀도는 H가 1194 [A/m]일 때 4000 [G]를 가진다 (TDK 사 제공). 또한, 일반적인 링 코어의 유효 투자율은 식 (21)에서와 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$\mu_r^* = \frac{2\pi bL}{N^2 \mu_0 S} \quad (21)$$

여기서 μ_r^* : 코어의 유효 투자율

L : 인덕턴스 [H]

N : 코일의 권수 [Turns]

μ_0 : 진공중의 투자율 [H/m]

S : 코어의 단면적 [m^2]

본 연구에서 사용한 코어는 외경 72 [mm], 내경 62 [mm], 두께 10 [mm]인 페라이트 코어이다. LF Impedance Analyzer(Hewlett Packard 4192)를 사용하여 인덕턴스를 측정하였으며, 1 [kHz]에서 인덕턴스는 약 40 [mH] 이었고 식 (21)에 대입하여 유효투자율을 구하면 약 10580이 된다. 원리에서 설명한 바와 같이 센서코어의 중요한 파라미터는 자기포화시의 전류와 구동주파수이다. 코어를 포화시키는데 필요한 전류는 식 (22)에 나타내었다.

$$I_{\text{sat}} = \frac{H_{\max} l_a}{N} \quad (22)$$

여기서 I_{sat} : 포화전류[A]
 H_{max} : 포화자장의 세기[A/m]
 N : 코일의 권수 [Turns]
 l_a : 코어의 평균 자로의 길이 [m]

H_{max} 가 1194 [A/m], 여자코일의 권수는 80회, 평균 자로의 길이가 0.067[m]이므로, 이 값들을 식 (22)에 대입하여 계산하면 포화전류는 약 1 [A]가 된다. 식 (19), 식 (20)으로부터 알 수 있듯이 최대 출력 값을 얻기 위한 H_{max} 는 H_{sat} 의 2배가 되어야 한다. 그러므로 실험에 사용된 코어에서 최대 출력값을 얻기 위해서는 약 2 [App]로 구동시켜야 한다. 여자코일은 코어에 균일하게 80회를 감았으며, pick-up용 코일은 그림 1과 같이 여자코일 위에 x축과 y축 각각 100회를 감았다.

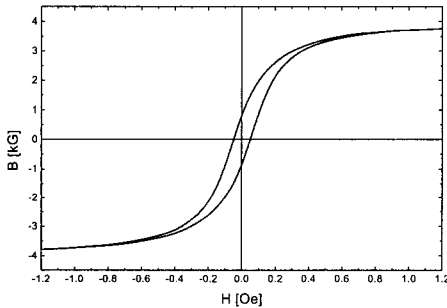


그림 5. H5C2 TDK 5Z22의 자기이력곡선.
 Fig. 5. Magnetization curve shape of a H5C2 TDK 5Z22.

2. 여자코일의 구동 및 검출회로

제작된 fluxgate 센서를 실험하기 위한 센서 시스템 구성도를 그림 6에 나타내었다. 주파수 발생부(Frequency Generator)는 RC발진을 사용하여 구형파를 만들었으며 만들어진 구형파는 주파수 분주부(Frequency Divider)에서 10분주하였다. Flip flop부에서 f_D 값을 다시 2분주하여 분주된 신호는 여자코일 구동부의 기본 주파수로 공급된다. 그리고 분주 전의 신호는 PSD회로에 동기 신호로 쓰기 위해 각각 여자코일 구동부(Driver Circuit)와 PSD 부에 공급된다. 여자코일 구동부는 여자코일에 충분한 전류를 공급하기 위해 n-MOSFET를 사용하였다. PSD 부는 여자코일 구동주파수의 2배가 되

는 기준주파수로 동기 정류하여 pick-up 코일 신호의 제 2고조파 성분을 검출한다. 동기검파 후단의 적분기는 PSD단의 출력을 받아 그 값을 적분하게 된다. 이 적분기를 통해 나온 전압은 A/D 변환기나 다른 신호처리를 위한 회로에 연결될 수 있으며, DVM 또는 다른 계측기를 이용하여 측정할 수 있도록 하였다.

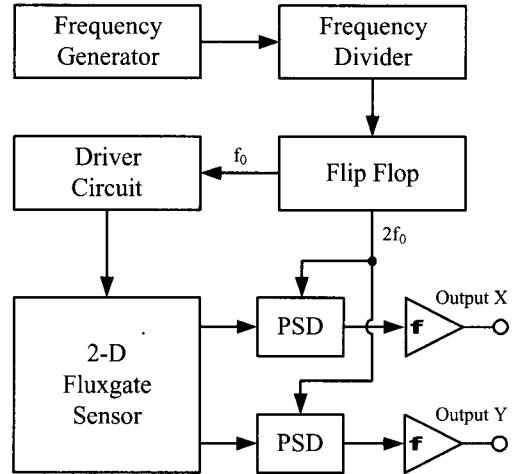


그림 6. 센서시스템 구성도.
 Fig. 6. Block diagram of the sensor system.

IV. 실험 결과

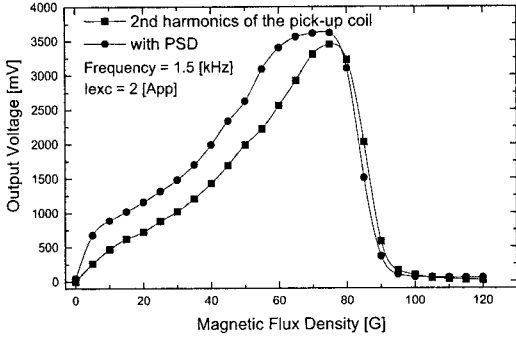
본 연구에서는 2 차원 fluxgate 센서를 포함한 시스템을 그림 8과 같이 설계, 제작하여 그 특성을 측정하였다.

그림 7(a)는 여자전류를 2 [App], 여자코일의 구동주파수를 1.5 [kHz]로 하고 외부자장을 120 [G]까지 변화시키면서 pick-up 코일의 제 2고조파 성분전압과 PSD 단의 출력전압을 측정 한 그래프이다. 외부자장이 증가함에 따라 80 [G]까지는 pick-up 코일의 제 2고조파 성분전압과 PSD 단의 출력 전압이 증가하였고 그 이후 감소함을 보인다. 이 출력전압의 파형 형태는 이론적으로는 정현파 형태가 되어야 하지만 정현파 형태가 되지 않는 것은 코어의 B-H 특성의 영향이라 생각된다.^[18]

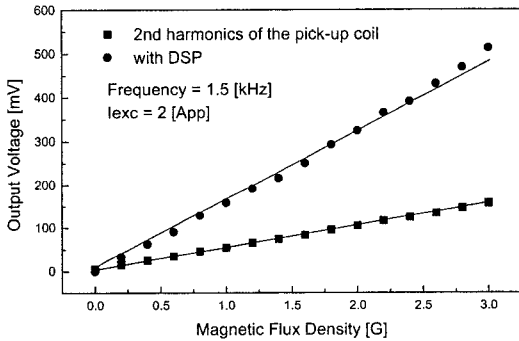
그림 7(b)는 그림 7(a)의 조건으로 3 [G]까지 측정 한 그림이다. 출력전압은 모두 거의 선형적으로 증가하고 PSD 단 출력전압의 증가율이 pick-up 코일의 제 2고조파 성분의 전압 증가

울보다 높음을 알 수 있다. 이는 PSD 단이 제 2고조파 뿐만 아니라 다른 우수고조파 성분도 포함해서 발생된 것이라 본다.

fluxgate 센서는 1.5 [kHz] 구동주파수, 2 [App] 구동전류에서 최대감도를 가지는 것을 알 수 있다.



(a)



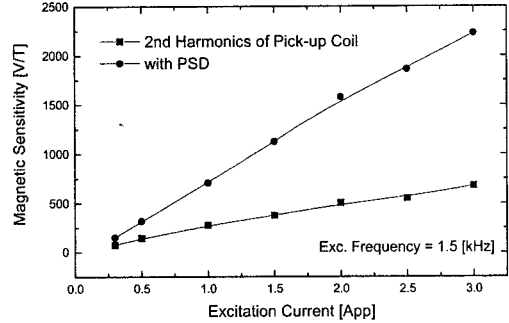
(b)

그림 7. 픽업코일의 출력전압.

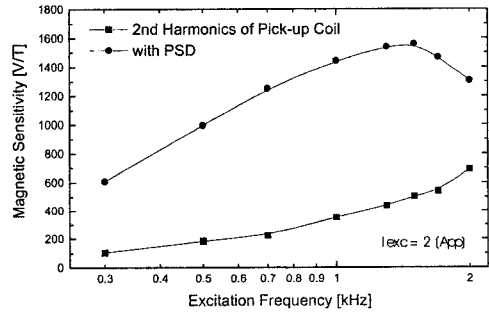
Fig. 7. The output voltage of a pick-up coil and PSD; (a) up to 120 [G], (b) up to 3 [G].

그림 8(a)는 여자주파수가 1.5 [kHz]일 때 여자전류를 0.3 [App]부터 3 [App]까지 가변하면서 pick-up 코일의 제 2고조파 성분의 감도와 PSD 단의 감도를 나타낸 것이다. 여자전류에 따른 감도는 여자코일에 전류를 많이 공급할수록 높은 감도를 얻었다. 그림 8(b)는 여자전류를 2 [App]로 고정하고 여자주파수를 0.3 [kHz]에서 2 [kHz]까지 가변했을 때 pick-up 코일의 제 2고조파 성분의 감도와 PSD 단의 감도를 나타낸 것이다. Pick-up 코일의 제 2고조파 성분의 경우는 2 [kHz]까지 계속 증가하였지만 PSD 단의 감도는 주파수가 1.5 [kHz]일 때 최대 감도를 가지고 있었으며 이 때 감도는 약 1580 [V/T]였다.

그림 8에서, 본 연구를 위해 제작된 2차원



(a)



(b)

그림 8. 감도의존성.

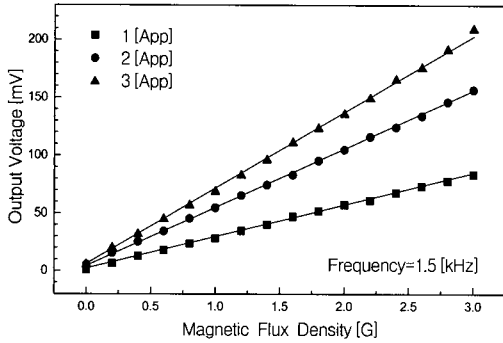
Fig. 8. Dependence of the sensitivity; (a) excitation current, (b) excitation frequency.

그림 9는 여자주파수를 1.5 [kHz]로 고정하고 여자전류를 바꾸어 가면서 pick-up 코일의 제 2고조파 성분의 전압과 PSD 단의 출력전압을 나타낸 것이다. 외부자장의 세기가 증가할수록 센서의 출력값도 증가하였다. 많은 전류를 흘리면 센서의 출력값은 증가하지만, 전력소비가 많아지기 때문에 본 센서에는 2 [App]로 구동하였다. 그림 15에서 여자전류가 2 [App]일 때 센서의 비선형계수를 계산하였으며 PSD 단 출력의 경우 약 2.3 [%], pick-up 코일의 제 2고조파 성분의 경우 약 1 [%]를 얻었다.

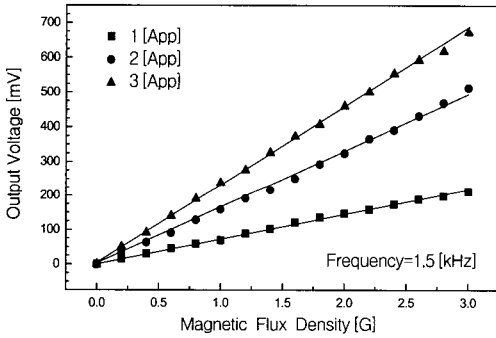
그림 10은 여자전류를 2 [App]로 고정하고, 여자주파수의 변화에 따른 pick-up 코일의 제 2고조파 성분의 전압과 PSD 단의 출력전압을 측정하는 것이다. 외부자장의 세기가 증가하면 출력전압도 같이 증가한다.

그림 10(a)에서는 주파수가 증가하면 출력전

압도 같이 증가하였다. 그리고, 그림 10(b)에서는 1.0 [kHz]보다는 1.5 [kHz]일 때가 전압이 더 크게 나타났지만 2.0 [kHz]가 1.5 [kHz]보다 작음을 알 수 있다. 따라서, 제작된 센서의 최적 구동주파수가 1.5 [kHz]임을 알 수 있으며, 그림 7(b)에서도 확인할 수 있다.



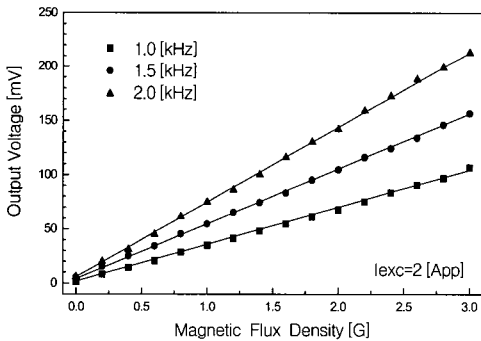
(a)



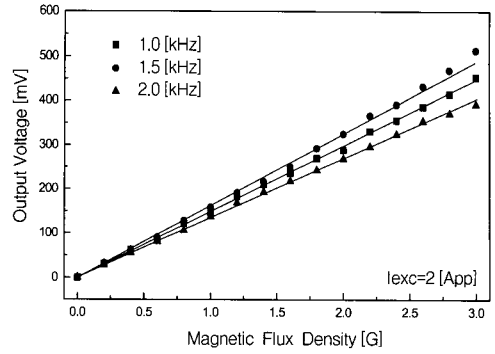
(b)

그림 9. 여자전류에 따른 출력전압.

Fig. 9. Output voltage for excitation current; (a) 2nd harmonics of the pick-up coil, (b) with PSD.



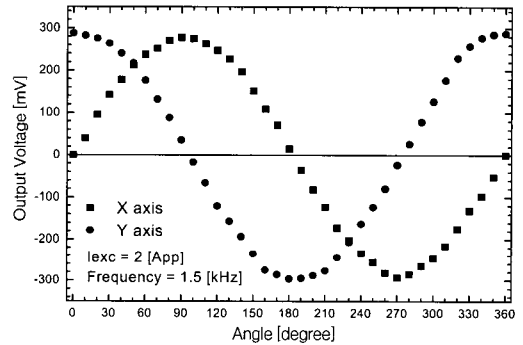
(a)



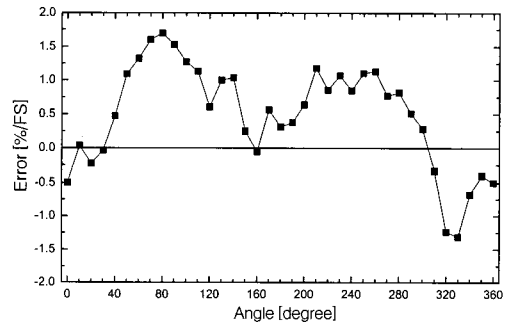
(b)

그림 10. 여자주파수에 대한 출력전압.

Fig. 10. Output voltage for excitation frequency; (a) 2nd harmonics of the pick-up coil, (b) with PSD.



(a)



(b)

그림 11. 센서의 각도의존 특성; (a) 회전각에 대한 출력전압 의존성, (b) 회전각의 의존성에 따른 에러율.

Fig. 11. Characteristics of angle-dependence of the sensor(2 [G]); (a) dependence of output voltage on rotational angle, (b) error rate of the dependence of rotational angle.

그림 11은 센서의 각도 의존성을 측정한 그림이다. 센서의 회전 단위는 10° 단위로 하였다. 그림 11(a)는 여자전류 2 [App], 여자주파수 1.5 [kHz], 외부자장의 세기가 2 [G]일 때 각도변화에 따른 x축과 y축 출력값을 나타낸 그림이다.

그 결과 x축과 y축의 출력은 거의 일치하였다. 그림 11(b)는 그림 11(a)의 각도 오차를 계산한 것이다. 각도오차는 full scale에 대해 약 ± 2 [%/FS]를 얻었다. 측정오차가 많이 수반되었으며 실제 오차는 이 값보다 더 작을 것으로 보인다. 그림 11은 각도변화에 따른 출력전압을 나타낸 것이다. 최대값과 최소값의 차이는 약 16 [mV]로 나타났으며 비교적 양호한 특성을 얻었다.

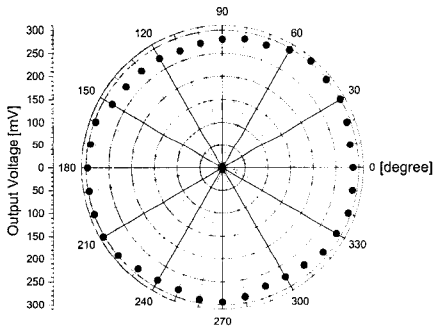


그림 12. 2차원 출력전압 특성.

Fig. 12. 2-dimensional output voltage characteristic.

V. 결 론

페라이트 링 코어를 이용한 2차원 fluxgate 센서를 제안하였다. 본 fluxgate 센서 시스템은 2차원 자장을 측정할 수 있는 센서와 그 센서를 구동하기 위한 구동회로, 그리고 신호처리회로 등으로 구성하였다. 신호 검출 방법으로는 우수고조파 성분 검출을 PSD(phase sensitivity detector) 회로를 사용하였다. 그리고 기존의 제 2고조파 검출법과 비교하기 위해서 pick-up 코일 출력전압의 제 2고조파 성분을 FFT 스펙트럼 분석기를 사용하여 측정하였다. 이렇게 측정된 제 2고조파 성분의 전압과 PSD 단의 출력전압을 비교하였다. 그 결과 여자전류의 증가에 따라 센서의 출력전압도 증가하였으며, 구동주파수

에 따른 PSD 단의 출력전압은 주파수가 1.5 [kHz] 일 때까지는 증가하였지만, 그 이상의 주파수에서는 감소함을 보였다. 그리고 pick-up 코일의 제 2고조파 성분의 전압은 계속 증가함을 보였다. 센서의 최대감도는 구동주파수 1.5[kHz], 구동전류 2 [App]에서 최대값을 보였으며 감도는 약 1580 [V/T]였다. 센서의 비선형계수는 3 [G]이내에서 제 2고조파 성분의 전압인 경우 약 1 [%]이내였으며 PSD 단 이후는 약 2.3 [%]이내였다. 그리고 각도오차는 약 ± 2 [%/FS]이내였다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 부경대학교 학술진흥재단 기성회 연구비로 수행되었습니다.

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] J. F. Scarzello and G. W. Usher, "A low power magnetometer for vehicle detection," IEEE Trans. Magn., MAG-13, pp. 1101-1102, 1977.
- [4] W. Gopel, J. Hesse, J. N. Zemel, "Sensors A Comprehensive Survey (Volume 5)," pp. 153-203, 1989.
- [5] Pavel Ripka, "Review of fluxgate Sensors," Sensors and Actuators, A 33, pp.129-141, 1992.
- [6] F. Primdahl, "The Fluxgate magnetometer," J. phys. E : Sci. instru., Vol. 12, pp. 241-253, 1979.
- [7] J. Piil-Henriksen, J M G Merayo, O V Nielsen, H Petersen, J Raagaard Petersen, F Premdahl, "Digital detection and feedback fluxgate magnetometer," Meas. Sci. Technol. 7, pp. 897-903, 1996.

- [8] F. Primdahl and P. A. Jensen, "Compact spherical coil for fluxgate magnetometer system," J. Phys. E. Sci. Instrum., Vol. 15, pp. 221-226, 1982.
- [9] W. A. Geyger, "The Ring Core Magnetometer - A New Type of Second Harmonic Flux-gate Magnetometer," AIEE Trans, Vol. 81, pp. 65-72, 1962.
- [10] M. H. Acuna and N. F. Ness, "The Pioneer XI High Field Fluxgate Magnetometer," Space Science Instrumentation 1, pp. 177-188, 1975.
- [11] Timothy J. Peters, "Automobile Navigation Using a Magnetic Flux-gate Compass," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-35, pp. 41-47, 1986.
- [12] Ulrich Wende, Detlef Kunze, Ralf Gottfried, "Planar flux-gate sensor: experimental data and theoretical analysis," Sensors and Actuators, A61, pp. 273-278, 1997.

著 者 紹 介

박 용 우 (朴用禹)

1998. 2. 부경대학교 제어계측공학과 졸업
 2000. 2. 부경대학교 대학원 전자공학과 졸업
 2002. 1. 현재 실리센드(주) 디지털미디어연구소 선임연구원

류 지 구 (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.
 주관심 분야 : 반도체 센서 및 집적화.

김 남 호 (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.
 주관심 분야 : 신호처리, 회로 및 시스템, 계측 시스템.