

工學碩士學位論文

지자기 측정을 위한 Lock-in Amp  
내장형 2차원 fluxgate  
센서에 관한 연구

指導教授 柳志久

이 論文을 釜慶大學校 電子工學科 林在煥 氏 提出함



釜慶大學校 大學院

電子工學科

林在煥

# 林在煥의 工學碩士 學位論文을 認准함

2003年 6月 26日

主 審 工學博士 鄭 守 泰



委 員 工學博士 金 南 虎



委 員 工學博士 柳 志 久



# 목 차

## Abstract

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1. 서론 .....                      | 1  |
| 2. fluxgate 센서 .....             | 3  |
| 2.1 센서코어의 재료 .....               | 3  |
| 2.2 센서의 구조 .....                 | 5  |
| 2.3 외부자장이 없는 상태에서의 동작 .....      | 6  |
| 2.4 외부자장이 있는 상태에서의 동작 .....      | 11 |
| 3. fluxgate 센서 설계 및 신호처리회로 ..... | 18 |
| 3.1 여자 및 pick-up 코일의 제작 .....    | 18 |
| 3.2 센서 신호처리 .....                | 20 |
| 3.3 여자코일 구동회로 .....              | 22 |
| 3.4 Lock-in Amp의 구성 .....        | 23 |
| 3.5 PSD 및 적분기 .....              | 24 |
| 4. 실험결과 .....                    | 25 |
| 5. 결론 .....                      | 31 |
| 참고 문헌 .....                      | 32 |

# A Study on 2-Dimensional fluxgate Sensor built in Lock-in Amp for Earth's Field Magnetometry

Jae-Hwan, Lim

*Department of Electronic Engineering*  
*Graduate School*  
*Pukyong National University*

## Abstract

In this paper, we have proposed 2-dimensional fluxgate sensor built in Lock-in Amp. This fluxgate sensor system is consist of a sensing clement, driving circuits for excitation coil and Lock-in Amp for detecting second harmonic components which is proportional to the DC magnetic to be measured. The ferrite sensor core is excited by a square wave form voltage through the excitation coil 40 turns. The turns of pick-up coil is 50. The second harmonic components is measured by signal processing circuits built in Lock-in Amp. This results are compared with PSD(Phase Sensitive Detector) circuit output and a FFT spectrum analyzer output. The measured maximum sensitivity is about 1850[V/T] at driving frequency of 3[kHz], excitation current 1[App]. The nonlinearity of this system(Lock-in Amp) is about 1.2[%/FS], In case of FFT spectrum analyzer is about 0.8[%/FS], and 1.8[%/FS](PSD). The linearity of this system is better than PSD. The angle error of this sensor system is about  $\pm 2$ [%/FS].

# 1. 서 론

센서는 여러 가지 물리량을 측정하는 도구로서 온도, 습도, 가속도, 압력, 자장, 광 등의 물리적 요소를 전기신호로 바꾸어 주는 변환기로 이용된다. 그 중 자장의 측정에 사용되는 센서는 홀효과를 이용한 홀소자로부터 자기저항소자 및 fluxgate 센서 등이 있으며, fluxgate형 센서는 자장검출범위에서 합리적인 가격에 높은 분해능을 가지는 특성으로 인해 활발히 연구되어 지고 있다. [1],[2],[3]

fluxgate센서는 자장세기의 시간에 대한 미분으로 출력하는 유도코일 센서와는 다르며, 자장내부에서 다른 두 위치 사이의 자장차이 및 주위 자장의 세기를 측정하는 것이다. 자장의 검출범위는 약  $10^{-1} \sim 10^6$  [nT], 분해능은  $10^{-1}$  [nT]로 알려져 있다. 이 분해능은 저가인 자기저항센서와 Hall센서 보다 매우 높고, 양자효과를 이용하는 SQUID 센서보다는 다소 낮은 수준이다. SQUID 센서는 상당히 고가이므로, 특수장비에 주로 이용되고 있다. [3],[4]

fluxgate 센서의 구조는 단일선형구조, 두 개의 평형코어 구조나 링 코어 구조로 나누어져 있다, 단일선형구조는 간단한 형태로 제작이 용이하나, 출력감도 및 선형성이 떨어지는 단점이 있으며, 평형코어 구조는 감도 및 출력선형성이 높은 장점이 있으나, 제작이 어려운 단점이 있다. 링코어 구조는 두 개의 평형코어 구조 센서가 가지는 물리적인 위치 및 균형을 맞춰야 하는 어려움을 피할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 제작이 용이하고, 출력감도 및 선형성이 우수하다. [4],[5]

fluxgate 센서의 검출방법은 펄스위치 검출방법, 펄스크기 검출방법, 제 2고조파 검출방법 등이 사용되고 있다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 검출방법은 펄스위치 검출방법과 제 2고조파 성분검출 방법이다.

펄스위치 검출방법은 비교기를 이용한 디지털신호처리 방식에 적합하며, 제 2고조파성분 검출방식은 아날로그 회로를 이용하여, 선형적인 전압 출력을 나타낼 수 있다.<sup>[3]</sup> 제 2고조파성분 검출을 위한 기존 아날로그 신호처리 회로에는 협대역 필터, PSD(Phase Sensitive Detector)회로 등이 사용되고 있으므로, 센서의 구동주파수를 자동적으로 추종, 동기 할 수 없는 단점이 있다.<sup>[3],[4]</sup>

본 논문에서는 이러한 점을 감안하여 fluxgate 센서의 신호처리회로에 극히 좁은 대역폭을 지닌 교류증폭기인 Lock-in Amp를 내장하여 제 2고조파 검출을 위해 제안 적용하였다.<sup>[5]</sup> 특히, 이 Lock-in Amp는 제 2고조파 성분에 대한 선택도를 높여 출력감도 및 선형성을 향상시키고, 센서의 구동주파수를 자동 추종하여 필터링을 할 수 있었다.

Lock-in Amp를 내장시킨 fluxgate 센서의 특성 측정결과 기존의 신호처리 (PSD 회로)에 비해 선형성이 우수하였고, ( $\pm 1.2[\%/FS]$ 이내) 절대감도는 약 1850 [V/T] 였다. 그리고, 각도의존 특성 측정결과 각도오차는 약  $\pm 2.0[\%/FS]$  범위 내에 있음을 알 수 있었다.

제작된 2차원 fluxgate 센서는 향후 지자장 측정, 해저광물 탐사 및 선박항해, 인공위성의 자세제어 자동차의 네비게이션 시스템 등에 많이 이용될 수 있을 것으로 생각된다.<sup>[1],[7]</sup>

## 2. fluxgate 센서

### 2.1 센서코어의 재료

대부분의 자기센서는 능동 혹은 수동성분의 형태로 자성재료를 포함하며, 이러한 성분들이 센서의 절대감도 및 구조를 결정하게 된다. 센서의 재료는 크게 soft와 hard 재료로 나누어지며, 특히 soft 재료의 고투자율이 센서에 적합한 재료가 된다. 여기서, 고투자율 재료라 함은 작은 자장의 세기에 매우 큰 자속밀도의 변화를 갖는 물질을 말하며, 표 1에 나타내었고, 표 2에는 센서로 적합한 자기재료를 나타내었다. 센서에 적합한 자성재료는 자기이력곡선의 모양이 Z형태를 나타내는 것으로 고투자율을 가진다.<sup>[4]</sup>

Table 1. Soft magnetic materials.

| Group                   | Code | Class   |
|-------------------------|------|---|
| Crystalline             | A    | · Irons   |
|                         | B    | · Low carbon mild steel                                     |
|                         | C    | · Silicon steel, mainly with 3% Si                          |
|                         | D    | · Other steels  |
|                         | E    | · Nickel-iron alloys<br>(5 Groups E1 ... E5 with 30% ~ 83%) |
|                         | F    | · Iron-cobalt alloys<br>(5 Groups F1 ... F3 with 23% ~ 50%) |
|                         | G    | · Other alloys as AlSiFe-alloys                             |
| Oxides                  | H    | · Soft ferrites as NiZn and MnZn oxides and others          |
| Amorphous metals        |      | · Amorphous alloys (Fe-based and Co-based alloys)           |
| Powder composite metals | —    | · Based on Fe and iron alloy powders                        |

Table 2. Magnetically soft materials for sensors.

| Sensor class              | material             | useful for                           |
|---------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| magnetogalvanic           | C,E                  | · slotted cores yokes                |
| magnetoelastic            | D                    | · shafts                             |
|                           | E1,I                 | · surface layers for shafts          |
|                           | C,E1                 | · laminated core packages, pot-cores |
| fluxgate                  | E1,H,I               | · strips and rods<br>torodial cores  |
| inductive,<br>edd-current | C,E2,E3              | · rods, yokes, laminated cores       |
|                           | H                    | · pot cores, rods                    |
| Wiegand, pulse-wire       | F,<br>special alloys | · wires                              |
| magneto-resistive         | E1,I,<br>Nico,NiFeCo | · resistors                          |

fluxgate 센서는 코어를 포화시킨 상태에서 이용될 수 있다. 코어의 포화를 위해서 전류를 흘려주어야 하는데, 이 전류량은 코어의 재질과 코어의 물리적 크기에 의해 결정된다. 투자율이 높은 재료에서는 적은 전류로도 코어가 쉽게 포화되어지며, 또한 단면적이 적은 코어일수록 코어 포화에 사용되는 에너지가 적으므로, 전류량을 줄일 수 있다. 그러나, 단면적이 적을 경우, 그만큼 감도가 감소되는 단점이 있다. 투자율이 큰 재료를 사용한 코어의 경우에는 적은 전류에도 포화가 빨리 일어나며, 전류의 변화가 미세하여도 자속밀도의 변화는 급격하게 이루어질 수 있다.<sup>[8]</sup> 이와같은 고투자율의 재료는 철과 니켈의 합금 등이 좋으며, 순철도 투자율이 높다고 알려져 있으나, 순도가 조금만 떨어져도 투자율이 급격히 떨어지는 단점이 있다. 철과 니켈의 합금비율은 78:22 78Permalloy, 79:16 Supermalloy 등이 있으며, 최근에서 니켈 함량이 90%이상되는 재료도 사용된다. 그러나 니켈 함량이 높으면 재질의 경도는 세어지나, 취성이 높아지며, 무거워지는 단점이 있다.<sup>[1],[6],[8],[9]</sup> 그러므로 페라이트 물질을 사용하는 센서는 크기와 감도 등과 같은 설계 사양에 많은 제약을 받는다. 그러나, 페라이트 코어는 가격이 저렴하며, 링형태 및 원하는 형태로 제작이 용이한 장점을 가지고 있다.<sup>[6]</sup>



fluxgate 센서는 자기이력곡선의 포화특성을 이용하는 센서로 자기이력 곡선의 모양에 따라 센서코어의 여자방법과 검출방법이 달라지게 된다. 따라서, 자성재료에 대한 연구도 중요한 요소이다. fluxgate 센서의 해석은 크게 다항식 함수, 구분선형 함수, 삼각 함수근사를 이용하여 해석하고 있으며, 본 논문에서는 구분선형함수 근사를 이용하였다.<sup>[4]</sup>

## 2.2 센서의 구조

링코어형 2차고조파 검출 fluxgate 센서는 지구 밖의 자장측정에 대해 유용하게 사용되고 있고, 표준 자장측정에 있어서 표준이 되는 자력계이다. 링형의 코어에는 3개의 코일이 감겨져 있는데 첫 번째는 여자코일로 링코어 주위에 권고하고 균일하게 감겨져있다. 여자코일에 전압이 인가되면 링코어의 단면을 따라 자력선이 형성된다. 여자코일의 인가전압은 교류형태이므로 자력선의 방향이 수시로 교체되고 있다.

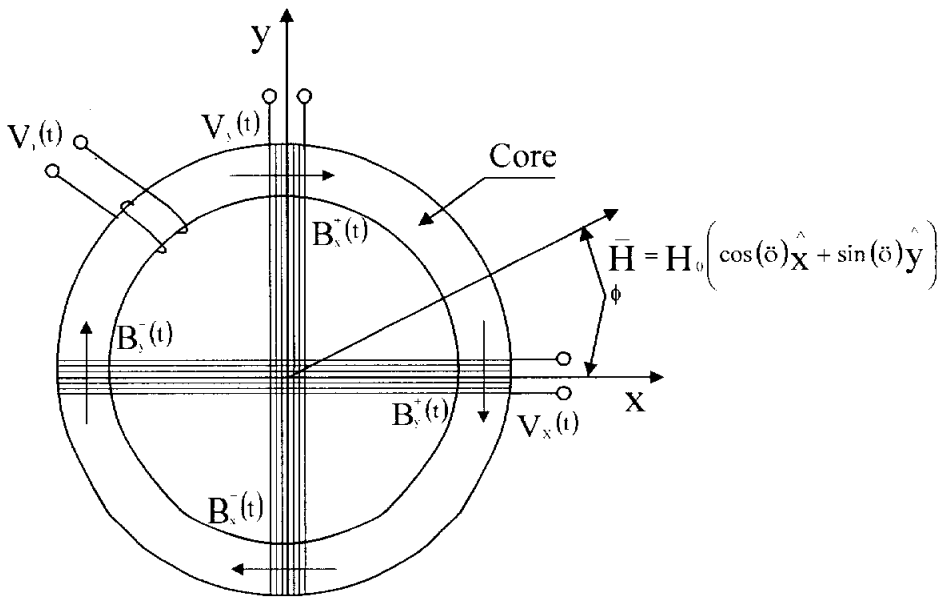


Fig. 1. Top view of a ring core fluxgate sensor.

외부자장에 대한 변화량을 검출하기 위해 링코어의 중심을 수직방향으로 검출코일이 단단하고, 가장적인 단면적을 가지도록 균일하게 감겨져 있다. 검출코일은 수직으로 감겨져서 X축, Y축에서 유도된 자장변화를 검출 할 수 있도록 구성되어있다.

Fig. 1에서 보는바와 같이 링코어 주위에 균일하게 코일을 감으며, 이 코일을 여자코일 또는 선자화코일이라 한다. 여자코일에 여자전류를 흘리기 위한 인가전압인  $V_{i(t)}$  가 인가되면 코어는 이력곡선의 특성대로 여자된다. 이 여자전류에 의해 코어는 내부에 자속의 흐름을 가진다. 코어위에 균일하게 감겨진 코일을 pick-up 코일이라고 한다. 이 pick-up 코일의 유기전압  $V_x(t)$  와  $V_y(t)$  는 코어내부 자속의 흐름에 유기된다. 유기된 전압은 코어의 두 개의 영역을 통해 시간 함수적으로 변화하기 때문에 각기 하나의 성분을 가지게된다.

X축에 놓여있는 코일을 통해 지나는 자속은 음의 X축을 가로지르는  $B_y^-(t)$  요소와 양의 X축을 가로지르는  $B_y^+(t)$ 로 구성되어지며, 외부자장에 의한 간섭이 없을 경우, 각 성분의 유기전압이 같기 위해서는, 코어의 단면적이 일정해야 하며, pick-up 코일이 균일하게 감겨져 있어야 한다.

fluxgate 센서는 고감도를 가지므로 센서의 구조적인 설계가 매우 중요하다. 코어의 단면적과 여자코일의 균일한 패턴 및 pick-up 코일의 정대칭 조건 및 균일한 패턴을 가져야만 옅센 및 노이즈를 줄일 수 있다.<sup>110)</sup>

### 2.3 외부자장이 없는 상태에서의 동작

fluxgate 센서를 수학적으로 해석하기 위해서는 먼저 센서에 인가되는 외부자장이 없을 때의 B-H곡선을 살펴볼 필요가 있다. Fig. 2는 외부자장이 없을 때의 이상적인 B-H 곡선이며,  $H_{max}$ 는 시간에 따라 변화하는 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.

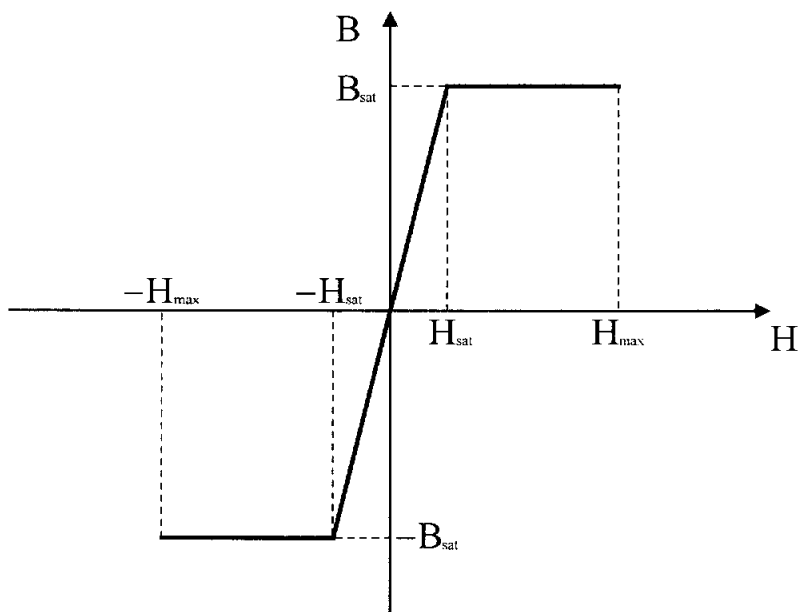


Fig. 2. B-H curve without external bias field.

일단 포화된 상태에서의 코어는 인가되는 자장의 세기에 무관하게 되어, 일정한 자속밀도를 유지한다. 자장의 세기  $H_y(t)$ 의 파형은 Fig. 3과 같이 구형파인 구동전압이 인가되고 코어의 히스테리시스 특성을 무시할 경우에 나타나는 이상적인 그림이다.

자속밀도는 전류에 비례한다. 각 반주기동안 포화상태의 시간을  $t_{sat}$ 라 하면 포화시간은 식 (1)과 같이  $H_{max}$ ,  $H_{sat}$ , 및 주기  $T$ 에 대한 항으로 표현된다.

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

Pick-up 코일을 통과하는 총 자속은 코일의 각 면으로부터 얻어진다. Pick-up 코일에 얻어진 기전력을 통한 자장은  $H_y^+(t)$ 와  $H_y^-(t)$ 에 해당하는 Y 성분의 값을 가지고 있다. 이  $H_y^+(t)$ 와  $H_y^-(t)$ 의 성분을 없애기

위해서는 pick-up 코일이 부의 X축과 양의 X축과 교차점을 가지지 않도록 코일의 폭을 좁게 감아야한다.  $H_y^-(t)$ 는 식 (2)와 같이 선형구간 함수로 표현된다. 코어의 같은 부분에서 자속밀도는 Fig. 2와 관련되어 식 (3)과 같이 표현된다.

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

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

$B_y^-(t)$ 는 식 (4)와 같이 푸리에 코사인 급수로 표현된다.

$$B_y^-(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \quad (4)$$

여기서  $a_n$  은 다음과 같다.

$$a_n = \frac{2\mu H_{\max}}{(n\pi)^2} (-1 + (-1)^n) \left[ \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{n\pi H_{sat}}{H_{\max}}\right) + \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi H_{sat}}{H_{\max}}\right) \right] \quad (5)$$

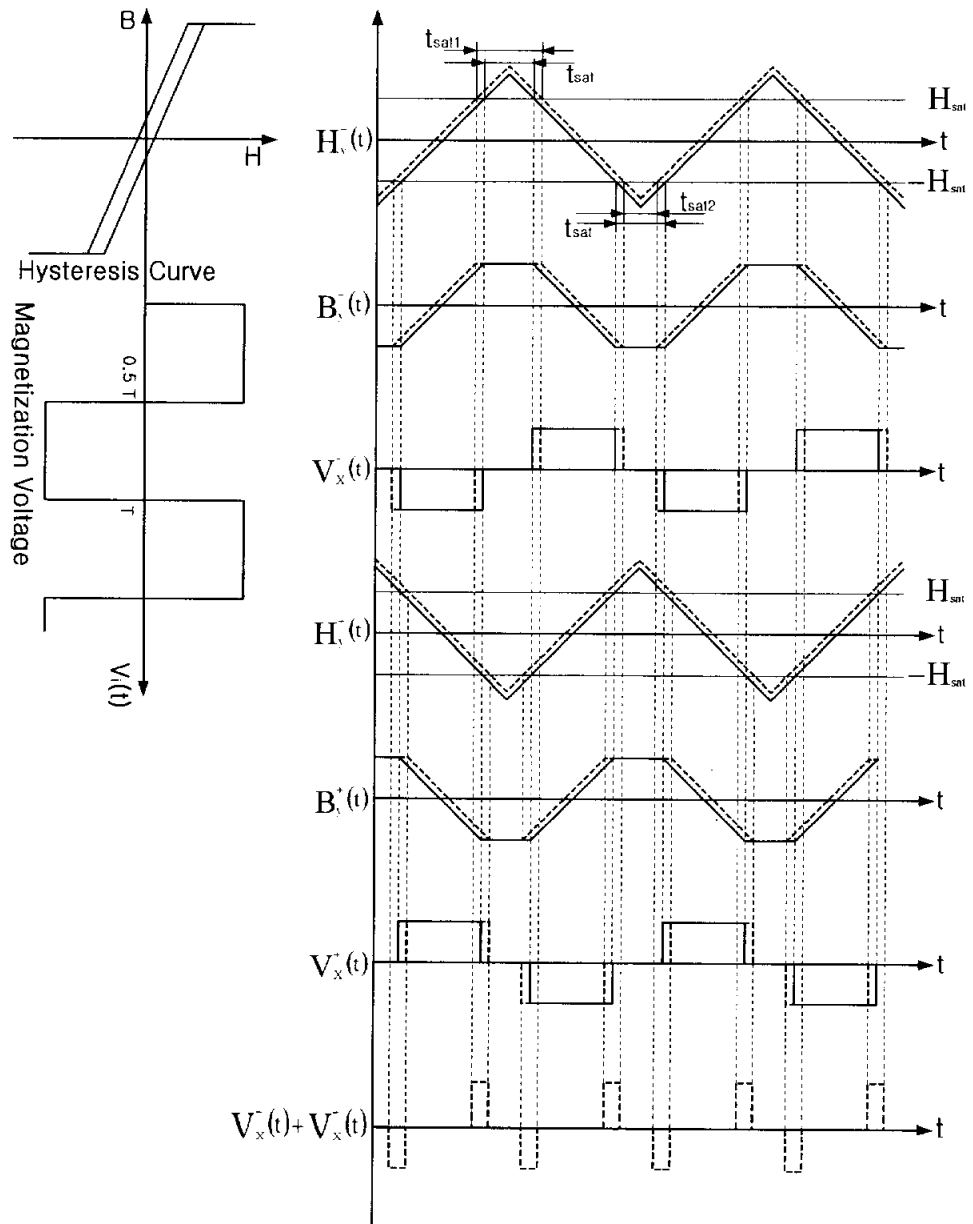


Fig. 3. Input and output relations for the pick-up coil.

식 (5)에서  $a_n$ 에 대한 표현에서 모든 짝수 항이 0임을 알 수 있다. 그러므로, 식 (5)는 식 (6)과 같이 단순화된다.

$$a_n = -\frac{4\pi H_{\max}}{(n\pi)^2} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(n\pi \frac{H_{sat}}{H_{\max}}\right) \quad (6)$$

그러므로,  $B_y^-(t)$ 는 식 (7)과 같이 된다.

$$B_y^-(t) = -\frac{4\mu H_{\max}}{\pi^2} \sum_{n=odd}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(n\pi \frac{H_{sat}}{H_{\max}}\right) \cos\left(\frac{2n\pi}{T} t\right) \quad (7)$$

$B_y^-(t)$ 에 의한 출력전압은 식 (8)과 같이 단면적 A, 권수 N 그리고  $B_y^-(t)$ 의 미분함수에 비례한다.

$$v_x^-(t) = -NA \frac{dB_y^-(t)}{dt} \quad (8)$$

$$v_x^-(t) = -\frac{8\mu NAH_{\max}}{\pi T} \sum_{n=odd}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(n\pi \frac{H_{sat}}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \quad (9)$$

$B_y^+(t)$ 에 의한 출력전압은 유사한 방법으로 식 (10)과 같이 유도된다.

$$v_x^+(t) = \frac{8\mu NAH_{\max}}{\pi T} \sum_{n=odd}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(n\pi \frac{H_{sat}}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \quad (10)$$

그러므로 pick-up 코일의 총 유기전압은 코어 양쪽의 출력전압의 합으로 식 (11)과 같이 된다.

$$v_x(t) = v_x^-(t) + v_x^+(t) \quad (11)$$

Fig. 3은  $B_y^-(t)$ 와  $B_y^+(t)$ 가 pick-up 코일에 의해 검출된 총 자속과 확실히 모양이 다르다는 것을 보여준다. 그 결과  $v_x^-$ 와  $v_x^+$ 의 합은 0이다. 그러므로 어떤 외부자장이 없는 곳에서의 pick-up 코일의 출력전압은 0이다.

#### 2.4 외부자장이 있는 상태에서 동작

fluxgate 센서에 외부자장이 인가되면 Fig. 2의  $B-H$  곡선과 다른 모양의  $B-H$  곡선을 적용하게 된다. Fig. 4는 pick-up 코일에 의해 둘러싸인 부분의  $B-H$  곡선을 보여준다.

Fig. 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. Fig. 4는 외부자장에 의해 변화된 입력과 출력을 보여준다.

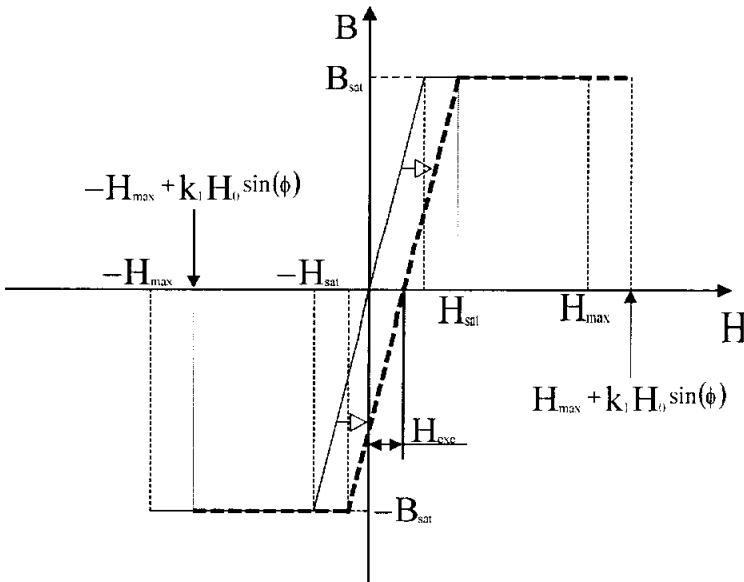


Fig. 4. B-H curve with external bias field.

$H$ 의 양의 반주기에 대한 포화시간을  $t_{sl}$ 과  $t_{\mathcal{L}}$ 는 식 (12)와 식 (13)과 같이  $H_{\max}$ ,  $H_{sat}$ ,  $T$  그리고  $k_1 H_0 \sin(\phi)$ 의 항으로 표현된다.

$$t_{sl} = \left( 1 + \frac{k_1 H_0 \sin(\phi)}{H_{\max}} - \frac{H_{sat}}{H_{\max}} \right) \left( \frac{T}{2} \right) \quad (12)$$

$$t_{\mathcal{L}} = \left( 1 - \frac{k_1 H_0 \sin(\phi)}{H_{\max}} - \frac{H_{sat}}{H_{\max}} \right) \left( \frac{T}{2} \right) \quad (13)$$

여기서, 계수  $k_1$ 은 외부자장의 세기와 코어내부의 자장의 세기에 대한 관계를 설명하며  $k_1$ 은 1보다 작다. 코어 내부의 자속밀도는 식 (14)에서 보는 것처럼 계수  $k_0$ 에 의해 외부 자속밀도에 비례한다.

$$B_y = k_0 B_0 \sin(\phi) \quad (14)$$

코어 내의 자장의 세기는 식 (15)와 같이 외부자장의 관계식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} H_y &= \frac{B_y}{\mu_0 \mu_r} = \frac{k_0 B_0 \sin(\phi)}{\mu_0 \mu_r} = \frac{k_0 \mu_0 H_0 \sin(\phi)}{\mu_0 \mu_r} \\ &= \frac{k_0}{\mu_r} H_0 \sin(\phi) = k_1 H_0 \sin(\phi) \end{aligned} \quad (15)$$

양의 X축을 횡단하는 코어 면에서의 자장의 세기는 식 (16)과 같이 부분연속 함수로 표현된다.

$$H_y^-(t) = \begin{cases} \frac{4H_{\max}}{T} t - H_{\max} + k_1 H_0 \sin(\phi), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ -\frac{4H_{\max}}{T} t + 3H_{\max} + k_1 H_0 \sin(\phi), & \frac{T}{2} < t < T \end{cases} \quad (16)$$



코어의 같은 면에 있어서의 자속밀도는 Fig. 4의  $B-H$  곡선을 사용해서 식 (17)과 같이 표현된다.

$$B_y^-(t) = \begin{cases} \mu H_y^-(t) = \frac{4\mu H_{\max}}{T} t - \mu H_{\max} + \mu k_1 H_0 \sin(\phi), & \frac{t_{s2}}{2} < t < \frac{T-t_{s1}}{2} \\ B_{sat}, & \frac{T-t_{s1}}{2} < t < \frac{T+t_{s1}}{2} \\ \mu H_y^-(t) = -\frac{4\mu H_{\max}}{T} t + 3\mu H_{\max} + \mu k_1 H_0 \sin(\phi), & \frac{T+t_{s2}}{2} < t < T - \frac{t_{s1}}{2} \\ -B_{sat}, & T - \frac{t_{s1}}{2} < t < \frac{T+t_{s2}}{2} \end{cases} \quad (17)$$

그리고,  $B_y^-(t)$  는 식 (18)과 같이 푸리에 코사인 급수로 표현된다.

$$B_y^-(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \quad (18)$$

여기서  $a_n$ 은 다음과 같다.  $a_0$ 의 항은 다음과 같으며 출력전압에 영향이 없으므로 무시할 수 있다.

$$a_n = \frac{4\mu H_{\max}}{(\pi n)^2} \left[ (-1)^n \cos\left(\frac{n\pi}{2} \left(1 - \frac{H_{sat}}{H_{\max}}\right) + \frac{n\pi}{2} \frac{k_1 H_0 \sin(\pi)}{H_{\max}}\right) - \cos\left(\frac{n\pi}{2} \left(1 - \frac{H_{sat}}{H_{\max}}\right) - \frac{n\pi}{2} \frac{k_1 H_0 \sin(\pi)}{H_{\max}}\right) \right] \quad (19)$$

양의 X축을 가로지르는 코어 면에 있어서 자속의 세기는 식 (20)과 같이 된다.

$$H_y^- = \begin{cases} -\frac{4H_{\max}}{T}t + H_{\max} + k_1 H_0 \sin(\pi), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ \frac{4H_{\max}}{T}t - 3H_{\max} + k_1 H_0 \sin(\pi), & \frac{T}{2} < t < T \end{cases} \quad (20)$$

코어의 같은 면에 있어서의 자속밀도 역시 식(21)과 같이 선형구간함수로 표현된다.

$$B_y^+(t) = \begin{cases} \mu H_y^+(t) = -\frac{4\mu H_{\max}}{T}t + \mu H_{\max} + \mu k_1 H_0 \sin(\phi), & \frac{s_1}{2} < t < \frac{T-t_{\mathcal{Q}}}{2} \\ B_{sat}, & \frac{T-t_{\mathcal{Q}}}{2} < t < \frac{T+t_{\mathcal{Q}}}{2} \\ \mu H_y^-(t) = -\frac{4\mu H_{\max}}{T}t - 3\mu H_{\max} + \mu k_1 H_0 \sin(\phi), & \frac{T+t_{s1}}{2} < t < T - \frac{t_{s1}}{2} \\ -B_{sat}, & T - \frac{t_{s1}}{2} < t < \frac{T+t_{s1}}{2} \end{cases} \quad (21)$$

또한  $B_y^+(t)$ 는 식 (22)와 같이 표현된다.

$$B_y^+(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) \quad (22)$$

여기서  $a_n$ 은 다음과 같다.

$$a_n = \frac{4\mu H_{\max}}{(\pi n)^2} \left[ \cos\left(\frac{n\pi}{2}\left(1 - \frac{H_{sat}}{H_{\max}}\right) + \frac{n\pi}{2} \frac{k_1 H_0 \sin(\phi)}{H_{\max}}\right) - (-1)^n \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{2}\left(1 - \frac{H_{sat}}{H_{\max}}\right) - \frac{n\pi}{2} \frac{k_1 H_0 \sin(\phi)}{H_{\max}}\right) \right] \quad (23)$$

X방향을 가리키는 코일을 통한 총 자속은 각 면에서의 합이며 식 (24),

식 (25)와 같이 된다.

$$B_y(t) = B_y^-(t) + B_y^+(t) \quad (24)$$

$$B_y(t) = -\frac{16\mu H_{\max}}{\pi^2} \sum_{n=\text{even}}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin\left(n\frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi k_1 H_0 \sin(\phi)}{2H_{\max}}\right) \cos\left(\frac{2n\pi}{T} t\right) \quad (25)$$

그러므로, 출력전압은 식 (26)과 같다.

$$v_x(t) = -\frac{32\mu N A H_{\max}}{\pi} T \sum_{n=\text{even}}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\left(1 - \frac{H_{\max}}{H_{\max}}\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2}\left(\frac{k_1 H_0 \sin(\phi)}{H_{\max}}\right)\right) \sin\left(\frac{2n\pi}{T} t\right) \quad (26)$$

비슷한 방법으로 Y축을 가리키는 코일에 대한  $B_x(t)$ 는 식 (27)과 같이 쓸 수 있으며 이때 출력전압은 식 (28)과 같이 표현된다.

$$B_x(t) = -\frac{16\mu H_{\max}}{\pi^2} \sum_{n=\text{even}}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\left(1 - \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi k_1 H_0 \sin(\phi)}{2H_{\max}}\right) \cos\left(\frac{2n\pi}{T} t\right) \quad (27)$$

$$v_y(t) = -\frac{32\mu N A H_{\max}}{\pi} T \sum_{n=\text{even}}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\left(1 - \frac{H_{\text{sat}}}{H_{\max}}\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2}\left(\frac{k_1 H_0 \cos(\phi)}{H_{\max}}\right)\right) \sin\left(\frac{2n\pi}{T} t\right) \quad (28)$$

식 (26)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 (29)와 식 (30)과 같이 된다.

$$v_x(t) = \frac{16\mu NAH_{\max}}{\pi} T \sin\left(\pi \frac{H_{sat}}{H_{\max}}\right) \cdot \sin\left(\pi \frac{k_1 H_0 \sin(\phi)}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (29)$$

$$v_y(t) = \frac{16\mu NAH_{\max}}{\pi} T \sin\left(\pi \frac{H_{sat}}{H_{\max}}\right) \cdot \sin\left(\pi \frac{k_1 H_0 \cos(\phi)}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (30)$$

식 (29)와 식 (30)의 진폭은 코어의 양면을 둘러싸는 pick-up 코일로부터 자기변조 출력진폭의 2배이다.  $k_1 H_0$ 의 양이  $H_{\max}$ 에 비해 매우 작다면 식 (28)과 같다.

$$v_x(t) = \frac{16\mu_0\mu_r}{T} k_1 H_0 \sin(\phi) \sin\left(\pi \frac{H_{sat}}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (31)$$

$$v_y(t) = \frac{16\mu_0\mu_r}{T} k_1 H_0 \cos(\phi) \sin\left(\pi \frac{H_{sat}}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (32)$$

그리고, 일반적으로 절대자기감도  $S_a$ 는 식 (29)와 같이 된다.

$$S_a = \frac{v_x(t)}{\mu_0 H_0} = \frac{16k_1\mu_r NA}{T} \sin(\phi) \sin\left(\pi \frac{H_{sat}}{H_{\max}}\right) \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (33)$$

실제 fluxgate 센서 설계에서는 감자효과(demagnetization effect)를 무시할 수 없다. 따라서 식 (33)에서 비투자율  $\mu_r$ 은 식 (34)와 같이 감자계수 D가 포함된 식으로 표현된다.<sup>[12],[13]</sup>

$$\mu_r^* = \frac{\mu_r}{1 + D(\mu_r - 1)} \quad (34)$$

여기서  $\mu_r^*$ 를 유효투자율이라 부르며, 이것은 코어의 형상에 의존한다. 감자계수 D는 링코어의 경우 식 (35)와 같이 주어진다.<sup>[4]</sup>

$$D \approx \left(\frac{l}{d}\right)^{-1.72} \quad (35)$$

여기서  $l$  은 코어의 평균길이,  $d$  는 코어 단면의 직경이다.  
따라서 감자효과를 고려한 절대감도는 식 (36)과 같이 표현되며 단위는  $[V/T]$ 이다.

$$S_a = \frac{16k_1\mu_r^*NA}{T} \sin(\phi) \sin\left(\pi \frac{H_{sat}}{H_{max}}\right) \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (36)$$

### 3. fluxgate 센서 설계 및 신호처리회로

#### 3.1 여자 및 pick-up 코일의 제작

fluxgate 형 자기센서는 페라이트 혹은 퍼말로이와 같은 고투자율 재료를 자심으로 사용하여 구동권선에 의해 여자자장을 가하고 그 자심의 자기포화 및 비선형 자기특성을 이용하여 외부자장에 비례하는 2차 고조파 성분을 측정함으로써 외부자장의 크기를 구하는 것이다. 본 연구에서 제작된 fluxgate 센서는 Fig. 5와 같은 페라이트 링코어를 사용하여 Fig. 6과 같은 2차원 fluxgate 센서를 제작하였다. 사용된 페라이트 링코어는 Yokokawa 사의 magnetization curve trace를 사용하여 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

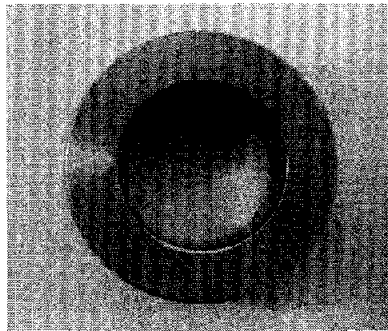


Fig. 5. Sensor core.

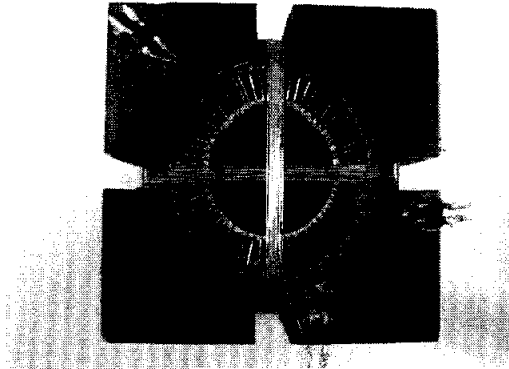


Fig. 6. 2-Dimension fluxgate sensor.

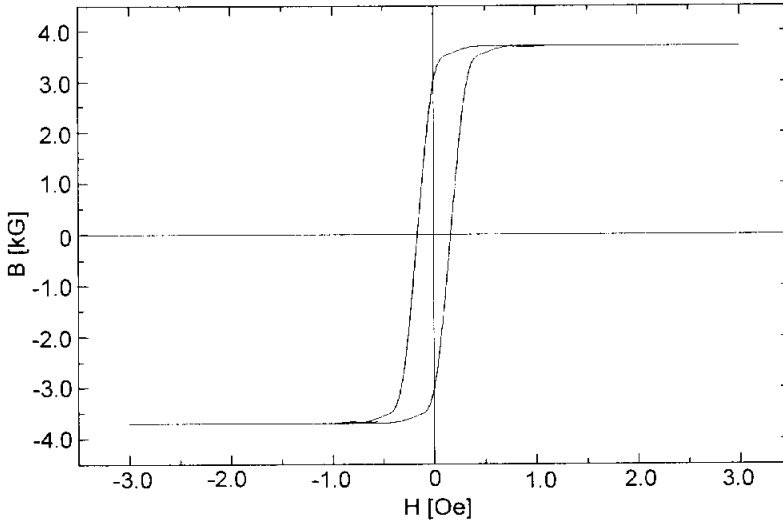


Fig. 7. Magnetization curve of ferrite ring core.

측정결과 초기투자율이  $18000 \pm 30$  [%]이었으며, 보자력  $H_c$ 는  $1.5$  [A/m] 잔류자속밀도  $B_r$ 은  $3400$  [G], 포화자속밀도는  $3500$  [G]를 가진다. 일반적으로 링코어의 유효투자율은 식 (38)과 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$\mu_r^* = \frac{2\pi bL}{N^2 \mu_0 S} \quad (38)$$

여기서  $\mu_r^*$ : 코어의 유효 투자율

$L$ : 인덕턴스 [H]

$N$ : 코일의 권수 [Turns]

$\mu_0$ : 진공중의 투자율 [H/m]

$S$ : 코어의 단면적 [ $m^2$ ]

본 연구에서 사용한 코어는 외경  $39$  [mm], 내경  $24$  [mm], 두께  $14$  [mm] 코어이다.

fluxgate 센서의 중요한 파라미터는 코어의 포화전류와 구동주파수이며, 코어를 포화시키는데 필요한 전류는 식 (39) 와 같다.

$$I_{sat} = \frac{H_{max} l_a}{N} \quad (39)$$

여기서,  $I_{sat}$  : 포화전류 [A]

$H_{max}$  : 포화자장의 세기 [A/m]

$N$  : 코일의 권수 [Turns]

$l_a$  : 코어의 평균 자로의 길이 [m]

코어의  $H_{max}$  가 320 [A/m], 여자코일의 권수는 30회, 평균자로의 길이가 0.09 [m]이므로, 이 값들을 식 (39)에 대입하여 계산하면 포화전류는 약 1.1[A]가 된다. 여자코일은 코어에 균일하게 40회 감았으며, pick-up 코일은 Fig. 1과 같이 여자코일 위에 X축과 Y축 각각 50회 감았다.

### 3.2 센서 신호처리

Lock-in Amp는 극히 좁은 대역폭을 지닌 고감도 교류전압 증폭기이다. 따라서 잡음전압을 낮추어 SNR을 향상시키기 위해 증폭기의 대역폭을 협대역으로 할 필요가 있다. 대역폭을 좁히는 방법으로 Q가 큰 BPF를 사용하면 되지만, 입력신호와 용이하게 동조해야 하고, 주파수 변동에 대해 증폭도가 변화하지 않아야 한다는 조건을 고려하면 Q의 값은 수십정도가 한계로 된다. 따라서 입력신호를 같은 주파수의 참조신호에 의해 동기검파하고 직류를 중심으로 하는 스펙트럼 배열로 변환하여 이 신호를 차단주파수가 낮은 LPF를 통하게 함으로써 입력신호에 포함된 잡음성분을 평균화하여 제거하는 것이 Lock-in Amp의 기본원리이다. 제작된 Lock-in Amp 시스템을 Fig. 8에 나타내었으며, fluxgate 센서 시스템의 블록 다이어그램은 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 입력신호는 Q=10인 BPF로 고조파 성분을 제거한다. 참조신호를 PLL1에 의해 duty ratio가 정확히 50%인 신호로 정형화하고 다음에 Phase Shifter에 의해 입력신호



의 위상과 동일하게 되도록 한다. 이 입력신호는 PSD에 의해 참조신호와 동기검파되며, 그 결과 참조신호의 주파수와 동일한 주파수를 가진 입력 신호만이 직류로 변환되고, 나머지 성분의 값들은 교류로 변환된다.

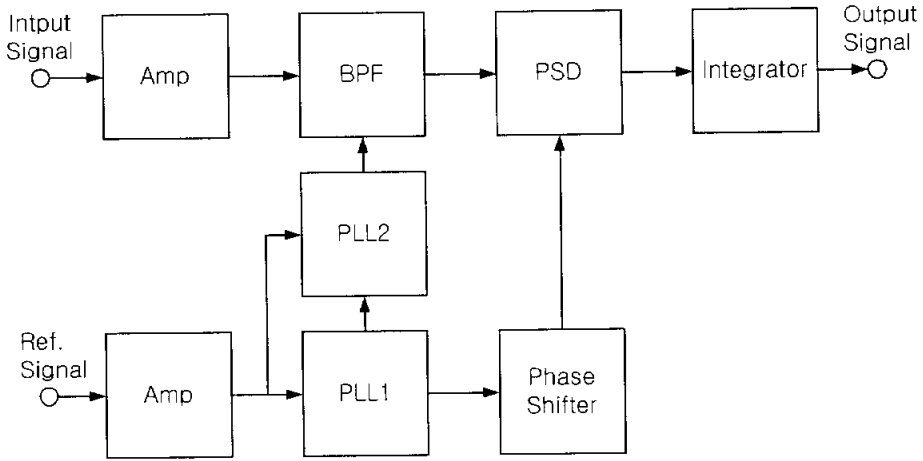


Fig. 8. Signal processing block diagram of Lock-in Amp.

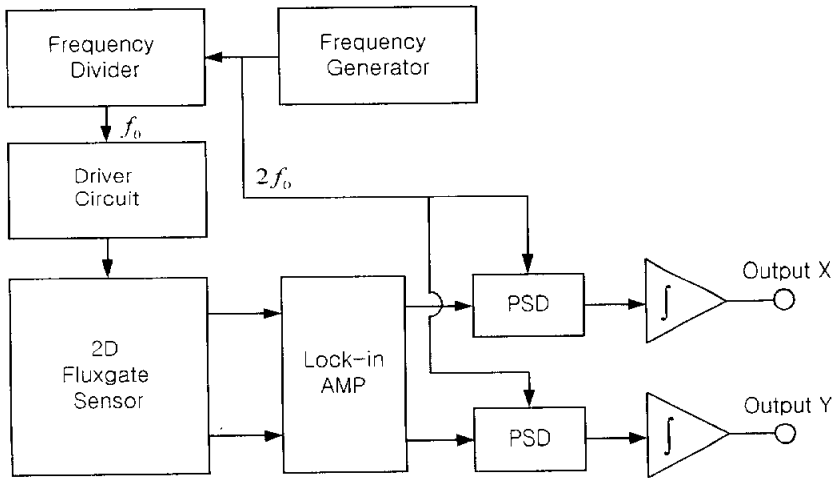


Fig. 9. The Fluxgate sensor system.

### 3.3 여자코일 구동회로

여자코일을 구동시키기 위한 신호는 op-amp를 이용한 R-C 구형파 발생기를 사용하였다. 그리고 flip-flop부에서  $f_D$ 값을 2분주하여 여자코일에 인가하였다. 이는 제 2고조파 검출형으로 fluxgate 센서의 출력을 얻고자 함이며,  $f_D$ 가 Lock-in Amp 및 PSD에 기준주파수로 인가되어 fluxgate 센서의 2고조파 출력과 동기신호로 사용하기 위함이다. 여자코일 구동부는 코일에 충분한 전류를 공급할 목적으로 P와 N형 MOSFET을 이용한 H-bridge 회로를 이용하였다.

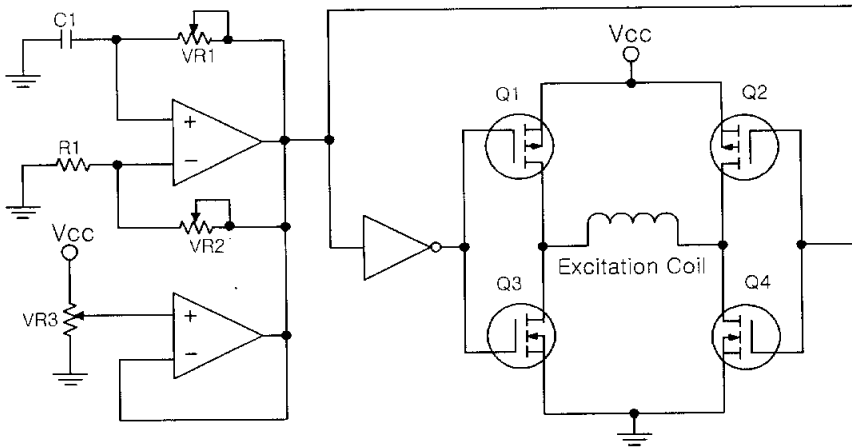


Fig. 10. The driving stage of fluxgate sensor.

### 3.4 Lock-in Amp의 구성

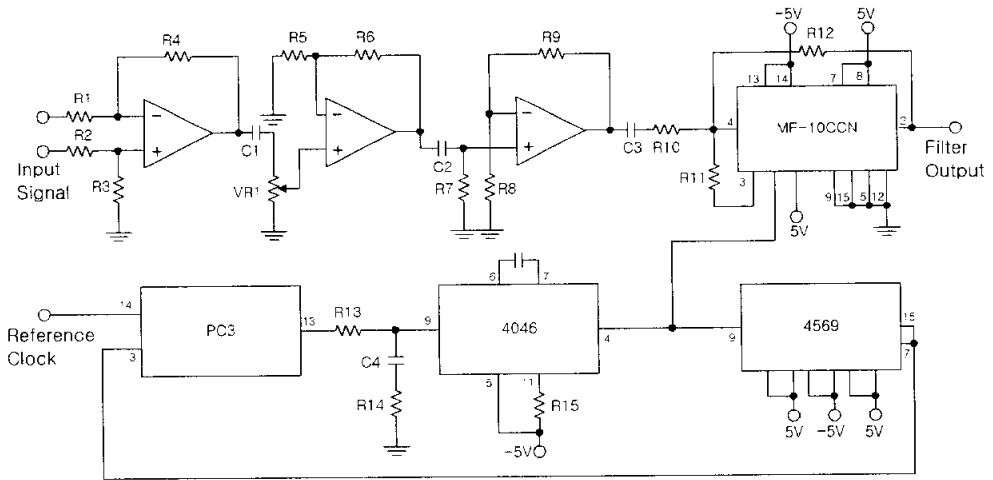


Fig. 11. The circuitry of Lock-in Amp.

Lock-in Amp를 통한 신호처리는 Fig. 11에 나타나 있다. 먼저 2차원 fluxgate 센서 pick-up 코일의 출력을 FET 입력형 op-amp인 초단증폭기를 통해 적정수준으로 증폭을 한다. 증폭된 신호의 잡음제거를 위해 Switched Capacitor Filter 인 MF-10을 이용하였다. MF-10의 동작모드는 Narrow Band Pass Filter의 형태로 사용하였으며, MF-10의 Reference Clock은 1/100 divider clock IC인 4569를 이용하였다. 4569 IC의 입력 clock은 PLL IC인 4046을 이용하였다.

### 3.5 PSD 및 적분기

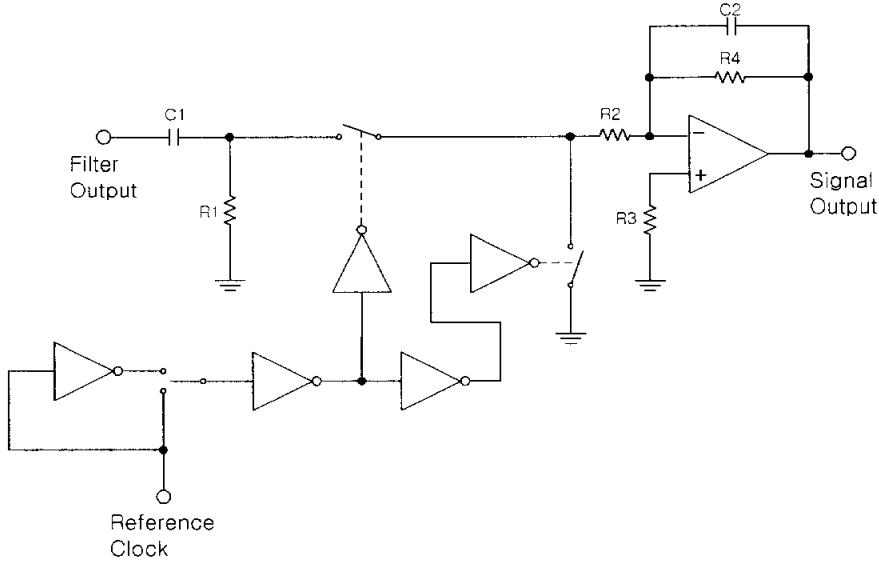


Fig. 12. The circuitry of PSD & Integrator.

필터로부터의 출력신호는 PSD 및 적분기를 이용하여 직류 전압출력으로 변화시켰다. PSD의 참조클럭은 PLL의 출력을 이용하였으며, 스위치를 이용하여 위상변화가 가능하도록 하였다. 적분기의 계수는 직류이득을 고려하여 적당한 값을 선정하였으며, 가변적으로 출력값을 조정하였고, 출력 전압은 A/D 변환기나 다른 신호처리회로에 연결될 수 있으며, DVM이나 다른 계측기를 이용하여 측정할 수 있도록 하였다.

## 4. 실험결과

본 연구에서는 2차원 fluxgate 센서 및 Lock-in Amp를 이용한 센서시스템을 Fig. 8 ~ Fig. 12와 같이 설계·제작하여 출력특성을 관찰하였다. 센서시스템의 측정장비로는 전압입력 및 출력파형 측정에 Tektronics 사의 TDS-224 Oscilloscope를 사용하였으며, 입출력전압 및 전류는 Yokokawa 사의 7555 Multimeter를 사용하였으며, 또한 자장측정을 위한 Gauss meter는 F.W bell 사의 9200 Gauss meter를 사용하였다. 센서시스템의 구동부인 H-bridge 회로의 여자코일 입력부분에 Tek. TDS-224 오실로스코프를 이용하여 여자코일의 구동전압 및 pick-up 코일의 검출파형을 측정하였으며, Fig. 13에 나타내었다. Fig. 14는 여자전류를 1[App], 여자주파수를 1.0[kHz]로 하고 외부자장을 120[G]까지 변화시키면서 센서시스템의 pick-up 코일의 제 2고조파 성분과 Lock-in Amp의 출력전압을 측정한 결과이다. 외부자장의 증가에 따라 출력전압이 증가하지만, 60[G]를 기점으로 Lock-in Amp 출력 및 2차고조파 출력전압이 감소함을 알 수 있었다. 이 출력전압은 이론상 sine 파형의 형태를 나타내어야 하지만, 그렇지 못하는 것은 코어의 B-H 특성의 영향이라 생각된다.<sup>[11],[14]</sup>

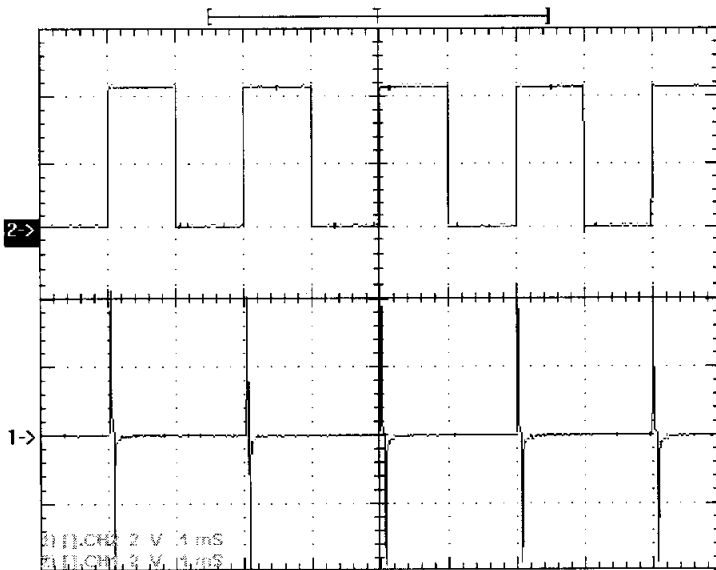


Fig. 13. Driving voltage and output voltage.

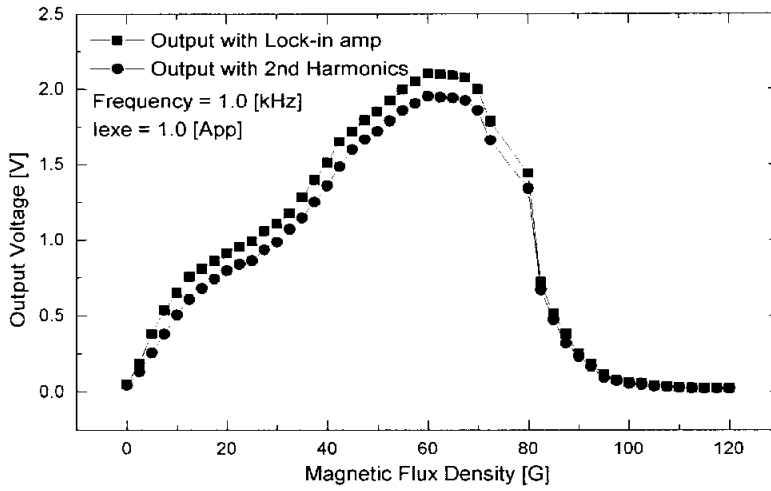


Fig. 14. Output voltage of pick-up coil.

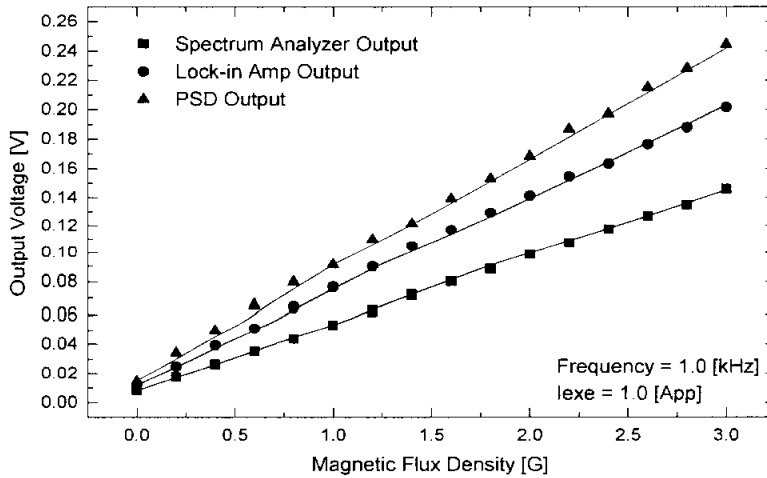


Fig. 15. Output Voltage of pick-up coil.

Fig. 15는 Fig. 14의 조건으로 각 외부자장을 3[G]까지 0.2[G]간격으로 측정된 그림이다. Specturm Analyzer, Lock-in Amp, PSD를 이용한 신호처리 방식을 비교하였다. 가장 우수한 선형성을 보이는 신호처리 방식은 Spectrum Analyzer로 제2고조파를 검출한것으로, Linearity가 약 0.8 [%/FS] 이었으며, 다음이 Lock-in Amp로 약 1.2[%/FS], 가장 낮은 선형성을 나타낸 신호처리 방식은 PSD로 약 1.8[%/FS]의 Linearity를 나타내었다.

Fig. 16은 여자전류 1[App]이고, 외부자장의 세기를 3[G]까지 증가시키면서, 여자주파수를 1[kHz], 2[kHz], 3[kHz]로 바꾸면서 출력전압을 측정 한 것이다. 17은 여자주파수 1[kHz], 외부자장의 세기를 3[G]까지 증가시키면서, 여자전류를 0.4[App], 0.5[App], 1[App]인 상태로 하여 출력전압을 측정한 것이다. 전류가 증가함에 따라 출력전압이 증가하지만, 1[App]이상의 전류에서는 출력전압의 증가가 거의 없었다. 이는 코어가 포화되어 더 이상의 유기자속이 없기 때문이라 생각된다.

Fig. 18은 1[App]로 하고, 인가자속을 3[G], 5[G], 10[G]로 하였을 때, 구동주파수를 4[kHz]까지 증가시키면서 센서의 출력전압을 관찰한 것이다. 구동주파수가 3[kHz]까지 증가할때는 출력전압이 증가하였으나, 3[kHz]이상에서는 출력이 감소하는 특성을 보였다. 따라서, 최적 구동주파수는 3[kHz]임을 알 수 있었다.

Fig. 19는 구동주파수를 1[kHz]로하고, 인가자속을 3[G], 5[G], 10[G]로 하였을 때, 구동전류를 3[App]까지 증가시키면서 Lock-in Amp의 출력을 측정한 것이다. 구동전류가 1[App]까지 증가할때는 선형적인 출력의 증가가 있었으나, 1[App]이상의 구동전류에 대해서는 센서의 출력은 증가하지 않았다. 이는 센서의 코어가 포화되어지면서 더 이상의 출력의 증가를 나타내지 못하는 것으로 생각되어진다.

Fig. 20은 센서의 각도 의존성을 측정한 그림이다. 여자주파수를 1 [kHz] 여자전류를 1 [App]로 하고, 3[G]하에서의 센서를 0.8도 간격으로 회전시키면서, X축 Y축 pick-up 코일의 출력을 측정한 것이다. 두 출력전압은 정확히 90도의 위상차이를 나타내었다. Fig. 21은 Fig. 20의 2차원 출력특성을 나타낸 것으로, 각도변화에 따른 출력변화를 나타낸 것이다.

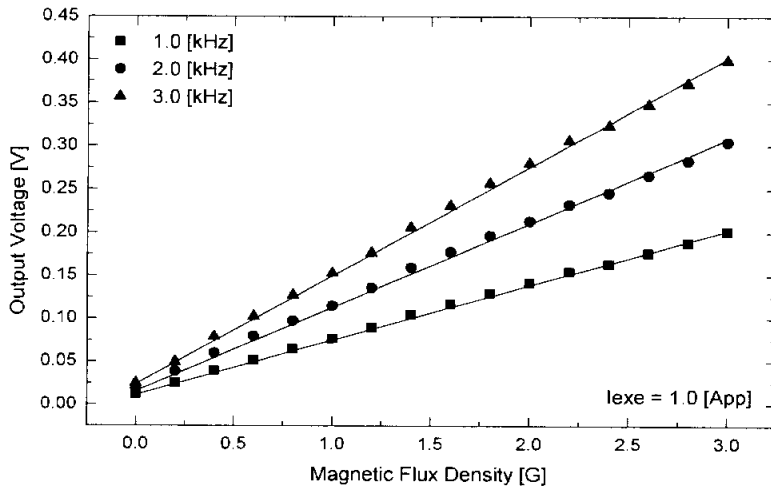


Fig. 16. Output voltage for excitation frequency.

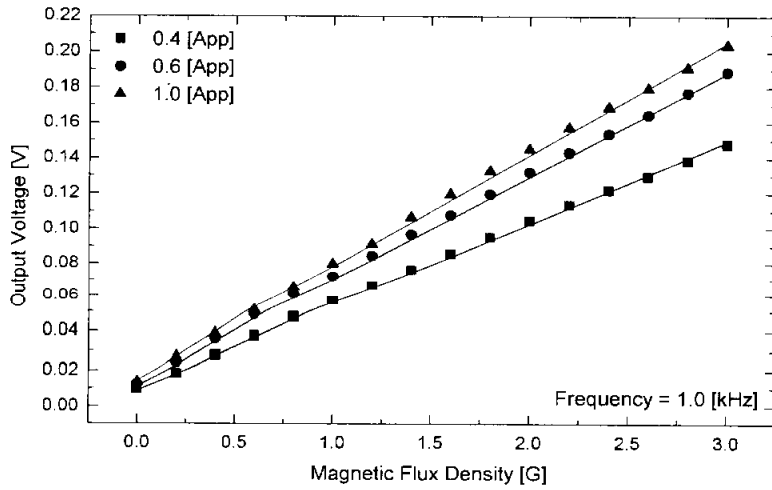


Fig. 17. Output voltage for excitation current.



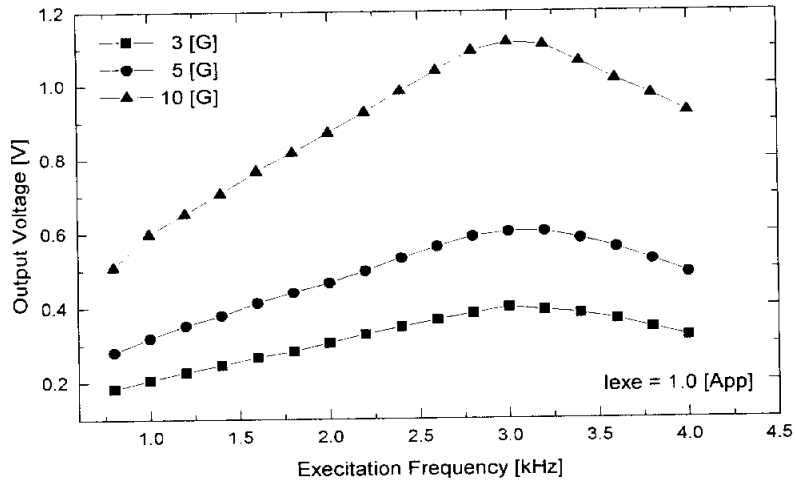


Fig. 18. Output voltage for excitation frequency.

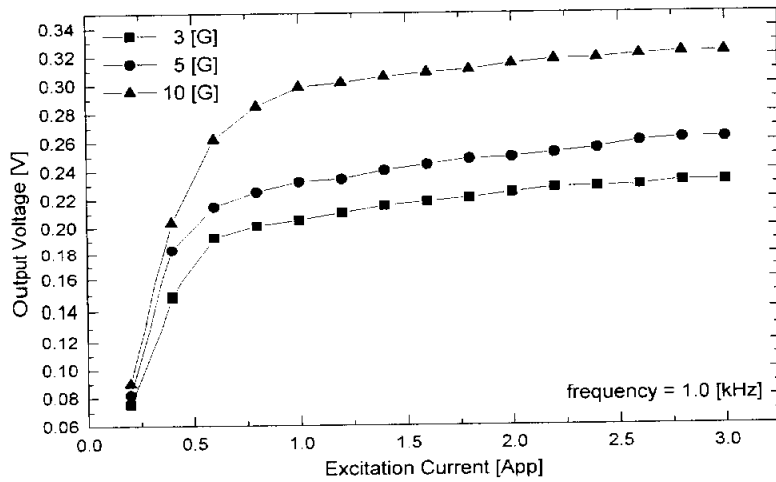


Fig. 19. Output voltage for excitation current.

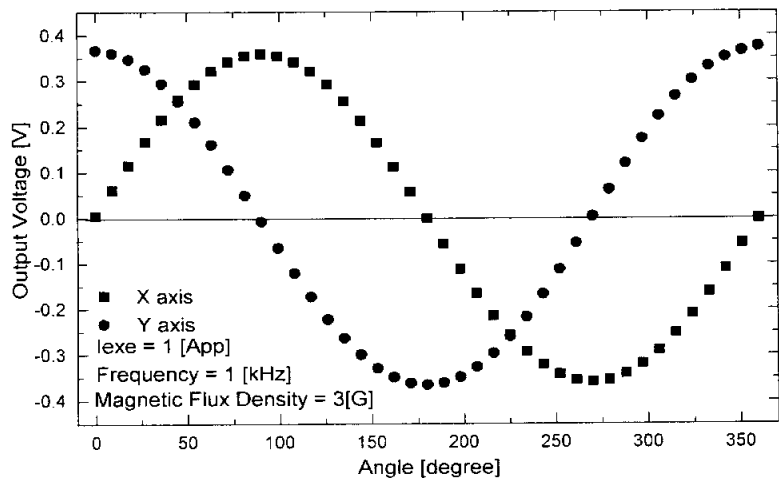


Fig. 20. Characteristics of angle-dependence.

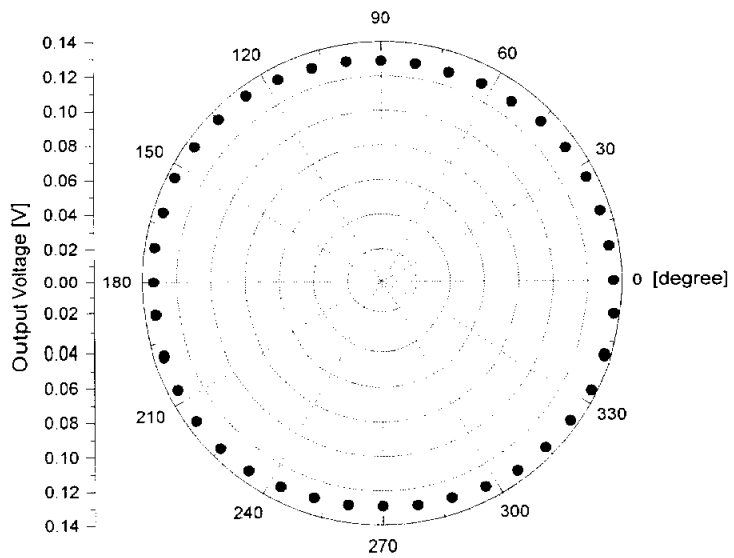


Fig. 21. 2-Dimensional output characteristics.

## 5. 결 론

본 논문에서는 페라이트 링 코어를 이용한 2차원 fluxgate 센서를 제작하고, 신호처리 회로에는 구동주파수를 자동 추종하여 필터링이 가능한 Lock-in Amp를 내장시킨 제 2고조파 검출회로를 제안·적용하였다.

제 2고조파 검출을 위해 사용된 Lock-in Amp는 SNR이 상대적으로 낮은 광학계통의 센서 신호처리를 위한 것으로, 입력신호의 주파수 변화에 동조하여 협대역의 밴드패스 필터계수값을 자동 추종하여 노이즈 및 고조파 성분을 제거한 후 출력전압을 나타내는 특성을 가지고 있다.

측정된 제2고조파 성분의 전압으로 최대감도 주파수와 전류를 결정하였으며, 스펙트럼 분석기를 통한 출력 및 PSD 회로의 출력과 비교하였다.

그 결과 여자전류가 1[App] 까지 증가하면 출력전압이 비례적으로 증가하였으나, 그 이상의 여자전류에 대해서는 출력전압이 증가하지 않았으며, 여자주파수는 약 3[kHz]에서 최대 출력전압을 나타내었다.

3[G] 이내의 저자장에서의 비선형계수는 FFT spectrums analyzer 에서 0.8[%/FS] 이었으며, PSD 회로만을 사용한 경우 1.8[%/FS]였고, Lock in Amp 및 PSD를 사용한 회로에서는 1.2[%/FS]로 PSD 회로에 비해 선형성이 우수하였다.

최대전압을 나타내는 구동주파수는 약 3[kHz], 구동전류는 약 1.0[App] 였으며, 감도는 약 1850[V/T] 였다. 그리고 각도오차는 약  $\pm 2$ [%/FS] 이 내였다.

## 참 고 문 헌

- [1] Pavel Ripka, "New directions in fluxgate sensors", Jour. Mag. and Mag. Mater., pp. 215-216, 2000.
- [2] Pavel Ripka, Petr Kaspar, " Portable fluxgate magnetometer", Sensor and Actuator A 68, pp. 286-289, 1998.
- [3] Pavel Ripka, "Review of fluxgate Sensors", Sensors and Actuators, A 33, pp. 129-141, 1992.
- [4] W. Gopel, J. Hesse, J. N. Zemel, "Sensors A Comprehensive survey. (Volume 5)", pp. 153-203, 1989.
- [5] P. Horowitz & W. Hill, "The Art of Electronics (second edition).", pp. 641-654, 2001.
- [6] F. Primdahl, "The Fluxgate magnetometer", J. phys. E : Sci. instru. vol. 12, pp. 214-253, 1979.
- [7] M. H. Acuna, "Fluxgate magnetometers for outer planet exploration", IEEE Trans. Magn., MAG-10, pp. 519-523, 1974.
- [8] G. P. Farrell & E. W. Hill, " The Limit of Fluxgate Sensitivity Due to Barkhausen Noise for Single Layer and Bi-Layer Permalloy Thin Film Cores", IEEE Trans. Magn. vol. 31, NO. 6, pp. 4050-4052, 1995.
- [9] D. I. Grodon, R. H. Lundsten, R. A. C. Hiaarodo, "Factors Affecting the Sensitivity of Gamma-Level Ring-Core Magnetometers", IEEE Transcations on Magnetics. vol. MAG-1 No. 4, pp. 330-337, 1965.
- [10] Ulrich Wende, Detlef Kunze, Ralf Gottfried-Gottfried, "Planar fluxgate sensor: experimental data and theoretical analysis", Sensor and Actuators, A61, pp. 273-278, 1997.
- [11] J. C. Cruz, H. Trujillo and M. Rivero, "New kind of fluxgate magnetometer probe with enhanced electronic processing", Sensors and Actuators, A71, pp. 167-171, 1998.

- [12] Pavel Ripka, "Contribution to the Ring-Core Fluxgate Theory," *Physica Scripta*. Vol. 40, pp. 544-547, 1989.
- [13] Thmoas Seitz, "Fluxgate Sensor in Planar Microtechnology", *Sensor and Actuator*, A21-A23, pp. 799-802, 1990.
- [14] Ulrich Wende, Detlef Kunze, Ralf Gottfried-Gottfried, "Planar fluxgate sensor: experimental data and theoretical analysis", *Sensor and Actuators*, A61, pp. 273-278, 1997.
- [15] O. Baltag, D. Costandache, "Magnetometer with Ferrofluid Fluxgate Sensor", *IEEE Instrument & Measurement. Conference*, pp. 263-265, 1996.
- [16] 임재환, 김남호, 류지구, "저자계 측정용 2차원 Fluxgate 센서의 특성에 관한연구", *한국통신학회 하계종합학술대회 논문집*, 제12권, 제1호, pp. 55-60, 2003, 6.
- [17] 임재환, 박한석, 안영주, 김남호, 류지구, "페라이트 링코어를 이용한 2차원 Fluxgate 센서", *한국신호처리·시스템 학회 하계종합학술대회 논문집*, 제4권 제1호, pp. 251-255, 2003, 6.

## 감사의 글

본 논문이 완성되기까지 부족함이 많은 저에게 학문에 대한 의미를 부여해 주시고, 아낌없는 사랑과 가르침으로 보살펴 주신 류지구 교수님께 깊이 감사 드립니다. 그리고, 바쁘신 와중에도 본 논문의 심사를 맡으시면서 좋은 논문이 될 수 있도록 많은 관심을 가져주신 정수태 교수님, 힘든 논문작업에 언제나 격려와 용기를 불어 넣어주신 김남호 교수님께 감사 드리며, 석사과정을 마치기까지 세심한 관심으로 지켜봐 주신 부경대학교 전자공학과 최혁환 교수님, 허만탁 교수님 그리고 2년동안 새로운 학문의 길을 열어주신 전자공학과 모든 교수님께 감사를 드립니다. 또한, 먼발치에서 항상 관심을 가지고 지켜봐 주신 제어계측공학과 최연욱 교수님, 변기식 교수님, 황용연 교수님, 안영주 교수님과 연구를 뒤로하면서 까지 실험장비의 사용을 허락하여 주신 전기공학과 박한석 교수님께도 감사의 말씀을 전합니다.

대학원 생활을 같이하면서, 동고동락하며 많은 도움을 주고, 전자공학과 김성우, 임채성, 오현숙, 김은숙님께 진심으로 감사드립니다.

논문을 준비하면서 많은 도움을 주었던 M&DSP 연구실의 배상범선배, 김남수 선배에게 감사의 말을 드리며, 논문준비를 같이하면서 서로 힘이 되어주었던 이상준님께 감사의 말을 전합니다. 사회에 진출하여 좋은 본보기를 보여주신 김승영 선배, 한학식 님께 행운이 함께하길 빌며, 실험실 후배 오세진, 류정휘, 이호, 김희동, 대학후배로 늦게 공부를 시작한 신현동, 강창성에게 좋은 결실 있기를 기원합니다. 논문준비에 여념 없던 저에게 힘찬 화이팅을 외쳐주었던 제어계측공학과 임상진, 후배, 문홍득 조교 선생, 박광덕 조교선생에게도 감사드립니다.

대학동기인 이종열, 박종원, 최부식, 형재필, 김상남, 손재훈 외 동기들에게 앞날에 행운과 건승하기를 빕니다.

고등학교 졸업이후 멀리떨어져 자주 만나지는 못하지만 마음만은 늘 함께 하는 친구 서영재, 장성수, 서영민에게 감사하며, 어려운 부탁도 잘 들어주며, 심한 장난도 잘 받아주고 이해해 주던 장성수, 이상철에게 고마움을 느낍니다.

항상 투명스럽게 잘 해주지 못해도 넓은 이해심으로 이해하고, 웃어주는 승영에게 감사하며, 고맙다고 전하고 싶습니다.

오랜 시간 동안 저에게 많은 관심과 염려를 하여주신 자형과 누나, 삼촌에게 즐거움을 주는 조카 민영이, 동영이, 멀리서 부처님 법을 위해 정진하시면서 항상 걱정과 격려를 하시던 명삼스님, 타지에서 고생하는데 오빠노릇도 제대로 못해준 동생에게 미안함을 느낍니다. 지금까지 한번도 편히 쉬어보시지 못하고 많은 고생을 하며, 못난 자식을 믿고 끝까지 사랑으로 이해해 주시던 아버님, 어머님께 진심으로 사랑한다는 말과 함께 옆드려 감사 드리며 이논문을 바칩니다.

아울러 이 논문이 나오기까지 많은 관심과 격려를 하여주신 모든 분들과 감사의 마음을 전하며, 앞으로 더욱 열심히 정진할 것을 맹세합니다.

2003년 8월

임 재 환 올림