

자기장 차이 측정용 플럭스게이트 마그네토미터 제작

최근하 · 손대락 · 조 육

한남대학교 이과대학 물리학과

대전시 대덕구 오정동 133, 300-791

(1995년 4월 17일 받음, 1995년 8월 2일 최종수정본 받음)

일차코일에 흐르는 전류에 의하여 코아의 피상 보자력을 측정하여 자기장을 측정 할 수 있는 두개의 플럭스게이트 센서로, 두 지점에서의 자기장 차이를 측정할 수 있는 플럭스게이트 마그네토미터를 제작하였다. 센서코아는 교류 자기이력곡선상에서 각형성이 좋은 Co-계 비정질리본 VITROVAC[®] 6030을 2 mm × 30 mm의 크기로 에칭하여 사용하였으며, 일차코일 및 이차코일은 각각 315회 권선하였다. 두 센서의 일차코일은 외부 자기장의 차이를 측정하기 위해 같은 극성으로 병렬로 연결하였고, 이차코일은 직렬 연결하여 적분하므로써 두 코아의 평균 자속밀도를 얻게 하였다. 본 연구에서 제작한 자기장 차이 측정용 플럭스게이트 마그네토미터는 1.6×10^6 V/T의 민감도와 1 Hz 주파수 대역폭에서 1 nT의 분해능을 얻었다.

I. 서 론

저자장 측정기술은 지자장 측정, 지하원 탐사, 항공우주공학(인공위성의 자세제어, 우주공간의 자장, 태양풍의 효과등의 측정)[1, 2], 비파괴 검사, 군사 분야, 의학 분야(자기심전계등)에서 널리 응용되고 있는 기술이다. 플럭스게이트 마그네토미터는 센서코아의 크기가 비교적 소형이고, 전력소모가 적으며, 높은 안정성을 갖는 특성 때문에 1 nT 정도의 분해능을 갖는 저자장 측정범위에서 많이 이용된다[3].

플럭스게이트 마그네토미터는 원리적인 측면에서 이차코일에 유도되는 기전력의 even harmonics을 이용하는 방법과, 일차코일에 흐르는 자화전류의 최대값의 변화, even harmonic 방법[4] 등이 있다. 또한 센서코어의 구조적인 면에서 보면 단일코어, 두개의 코어[5], 원형코어 방법[6] 등이 있다. 현재 가장 널리 보급되어 있는 플럭스게이트의 원리는 원형코어와 이차코일에 유도되는 기전력을 측정하는 방법이다. 원형코어를 사용할 경우 두개의 동일한 센서코어 제작이 매우 어렵기 때문에, 두 지점에서의 저자장의 차이를 측정하기 위해서는 두 코어 방식을 사용하고 있다. 본 연구에서는 두개의 코어를 사용하여 일차코일에 흐르는 전류에 의하여 피상 보자력을 측정하는 플럭스게이트 마그네토미터[3]의 원리를 응용하여 이동이 용이한 두개의 센서코어를 사용해 두 센서 위치에서 자기장의 벡터성분 차이를 측정할 수 있는 플럭스게이트 마그네토미터를 제작하고 그 특성을 측정하였다.

II. 측정 원리

코어에 일차코일 N_1 과 이차코일 N_2 를 권선하고, 일차코일에 흐르는 전류를 전압으로 변화시키기 위해 저항 R_1 을 연결한 Fig. 1-a)의 자기회로에서 일차코일에 전압이

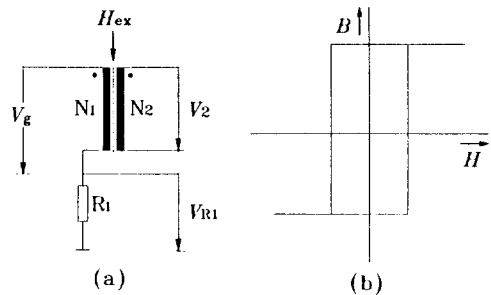


Fig. 1. Idealized magnetic circuit (a) and hysteresis loop (b) for the modeling of the flux-gate magnetometer.

$V_g \sin \omega t$ 인 정현파를 가해주면 이 회로의 미분방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_g \sin \omega t - \frac{d\Phi}{dt} = i_1 R_1 \quad (1)$$

일차코일에 흐르는 전류에 의한 코어의 자기장 세기 H_s 는

$$H_s = \frac{N_1}{l_m} i_1 \quad (2)$$

이고, 여기서 l_m 은 유효자기행로(effective magnetic path length)이다. 자속의 시간에 대한 미분은

$$\frac{d\Phi}{dt} = N_1 A \frac{dB}{dH_s} \frac{dH_s}{dt} \quad (3)$$

로 표현할 수 있고, 외부자장 H_{ex} 가 코어에 가해진다고 가정하면 전체 자기장의 세기는

$$H = H_s + H_{ex} \quad (4)$$

가 되므로 식 (2), 식 (3) 및 식 (4)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같은 미분방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dB(H_s + H_{ex})}{dH_s} \frac{dH_s}{dt} + \frac{l_m R_1}{N_1^2 A} \\ = \frac{V_g}{N_1 A} \sin \omega t \end{aligned} \quad (5)$$

이 미분방정식의 해를 간단하게 구하기 위해 Fig. 1-b)와 같이 이상적인 직사각형의 교류 자기력곡선을 갖는 코어에 대해 미분방정식을 풀어보면 Fig. 2와 같은 결

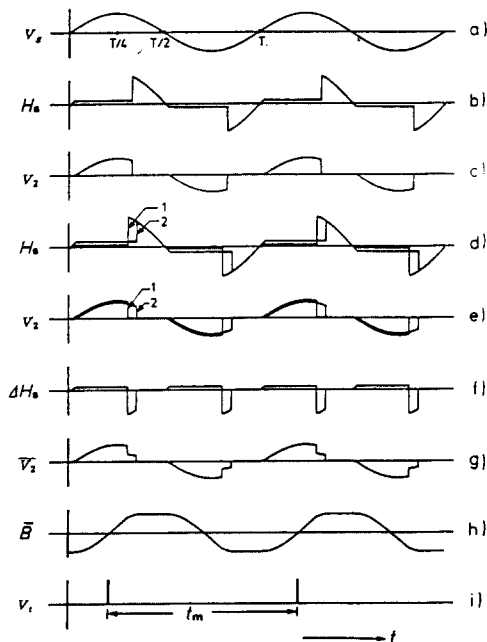


Fig. 2. Solutions of differential equation for the idealized magnetic circuit and the square shape of hysteresis loop.

과를 얻을 수 있다. Fig. 2-a) 파형은 일차코일에 가한 정현파 전압이고, Fig. 2-b)는 일차코일에 흐르는 전류이며, Fig. 2-c)는 이차코일에 유도되는 기전력의 파형이다. 자기장 기울기 측정용 플럭스게이트 마그네토미터는 두 지점에서의 자기장 차이를 측정해야 하므로 앞에서 언급한 특성을 갖는 두개의 동일한 센서코어를 사용해야 한다. 두 센서코어의 일차코일은 병렬로 연결하여 동일한 크기의 전압으로 자화될 수 있게 하였고 이차코일은 직렬로 연결하였다. 만약 두 코어에 외부 자기장이 각각 H_{ex1} , H_{ex2} 로 가해졌을 경우 두 코어의 피상 보자력 H_{sc} 는 다음과 같이 된다.

$$H_{sc1} = H_{c1} + H_{ex1} \quad (6)$$

$$H_{sc2} = H_{c2} + H_{ex2} \quad (7)$$

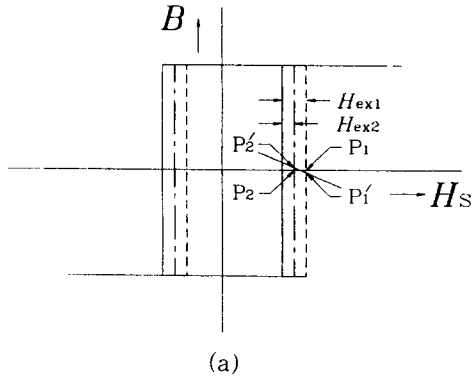
만약 고유 보자력이 동일한 두 코어를 사용하면, $H_{c1} = H_{c2}$ 이므로

$$H_{sc1} - H_{sc2} = H_{ex1} - H_{ex2} \quad (8)$$

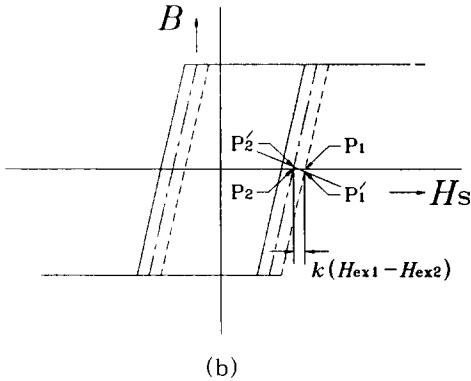
가 되고, 두 코어의 피상 보자력 차는 두 코어에 가해진 외부자장의 차가 되고, 이는 일차코일에 흐르는 전류의 차이에 비례하게 되므로 일차코일에 흐르는 전류의 차를 측정하면 가해진 외부자장의 차를 측정할 수 있다. Fig. 2-d)는 두 코어에 외부자장이 서로 다른 H_{ex1} , H_{ex2} 로 가해질 경우 일차코일에 흐르는 전류의 파형이다.

외부 자기장을 측정하는 시점을 구하기 위해 두 코어의 이차코일에 유도되는 기전력의 평균을 취하면 Fig. 2-g)가 되고 다시 적분하면 두 코어의 평균 자속밀도에 비례하는 Fig. 2-h)의 파형을 얻을 수 있다. Fig. 2-h)의 파형에서 zero crossing points는 외부자장과 무관하게 일정한 시점을 갖기 때문에 이 시점을 외부 자기장 기울기 측정 시점으로 택했다.

Fig. 2-d)와 Fig. 2-e)의 파형으로 부터 교류 자기력곡선을 그려보면 Fig. 3-a)와 같다. 여기서 P_1 과 P_2 는 각 코어의 피상 보자력(H_{sc1} , H_{sc2})점이다. 그러나 두 코어의 보자력이 동일한 시점에 위치하지 않고 측정시점을 두 코어의 평균자속밀도가 zero crossing하는 점을 택하였으므로 피상 보자력 측정시점에서 벗어나 측정되게 된다. 즉 P_1' , P_2' 점에서 측정하게된다[7]. 교류 자기력곡선이 이상적인 사각형 형태를 갖는다면 보자력의 측정시점이 달라도 무관하지만, 실제 센서 제작에 있어서는 코어의 반자장계수(demagnetizing factor)에 의해 교



(a)



(b)

Fig. 3. Hysteresis loop changes under an external magnetic field (a) and shearing of hysteresis loop by demagnetizing effect (b).

류 자기이력곡선은 Fig. 3-b) 처럼 기울어지게 된다. 그러므로 피상보자력의 차이는 비례상수 k 만큼 외부자장의 차이와 달라진다.

$$H_{sc1} - H_{sc2} = k(H_{ex1} - H_{ex2}) \quad (9)$$

III. 마그네토미터의 제작

본 연구에서 제작한 자기장 기울기 측정용 플럭스게이트 마그네토미터의 센서 코어는 센서의 동특성을 높이기 위해 자화주파수가 높고, 또한 자기이력곡선의 각형성이 좋으며, 코어 노이즈가 작은 두께 $25 \mu\text{m}$ 의 Co-계 비정질 리본(VITROVAC® 6030)을 $2 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 의 크기로 에칭하여 사용하였으며, 직경 0.15 mm 의 에나멜 동선을 일차코일과 이차코일 각각 315회 권선하였다.

Fig. 4는 자장 기울기 측정용 플럭스게이트 마그네토미터의 구성도로써 두 센서코어의 일차코일은 정현파 전원공급장치와 병렬로 연결하였다. 일차코일에 흐르는 전

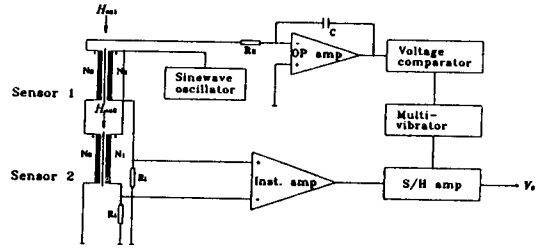


Fig. 4. Schematic diagram of the magnetic gradient flux-gate magnetometer.

류를 전압으로 변환시키기 위해 두 일차코일에 직렬로 25Ω 저항을 연결하였고, 두 전압의 차이를 계측 증폭기로 증폭하여 Sample and Hold(S/H) 증폭기의 아날로그 입력단에 입력하였다. 한편 측정가능한 최대자기장을 $2 \times 10^{-4} \text{ T}$ 로 선정하여 이 자기장범위까지 코어가 포화되게 정현파 전압을 조절하였다. 두 코어의 평균 자속밀도가 영인 지점에서 샘플링 펄스를 만들기위해 두 센서의 이차코일은 직렬로 연결하고 Miller 적분기로 적분하여 평균 자속밀도에 비례하는 전기적 신호로 만들고, 전압 비교기와 mono-stable multi-vibrator를 사용하여 샘플링 펄스를 만들어 S/H 증폭기의 디지털 입력단에 입력하였다. 이때, 샘플링 펄스의 주파수는 코어의 자화주파수와 동일한 20 kHz 이다.

이 경우 마그네토미터의 출력전압과 두 센서 위치에서 자기장의 벡터성분 차는 식 (10)으로 부터 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$V_o = \frac{kG\mu_m R_1}{\mu_o N_1} \Delta B_{ex} \quad (10)$$

여기서 G 는 Fig. 4의 계측증폭기의 이득이고, μ_o 는 공기의 투자율이다.

본 연구에서 제작한 마그네토미터에서 $\frac{kG\mu_m R_1}{\mu_o N_1}$ 는 $1.6 \times 10^6 \text{ V/T}$ 였다.

IV. 마그네토미터의 특성측정

자기장 기울기 측정용 플럭스게이트 마그네토미터의 특성측정을 위해서는 자기장 구배(magnetic field gradient)를 발생시키는 장치로 반경 5.7 cm , 폭 10 cm , 권선수는 3250회인 코일의 자기쌍극자모멘트에 의한 자기장 분포를 이용하였다. Fig. 5는 자기장 차이를 측정하기 위해 자기장 구배를 발생하는 장치이다. 자기쌍극자모멘트 발생용 코일의 축방향을 x 축으로 잡았을 경우 코일

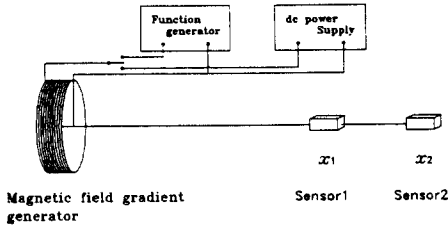


Fig. 5. Experimental setup for the magnetic field gradient experiment.

중심으로 부터 거리에 따른 자기장은

$$B_x = \frac{\mu_0 NI}{2} \frac{2}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (11)$$

이다. 여기서 x 는 코일의 중심에서 센서위치까지의 거리이고 a 는 코일의 반경이다. 두 센서를 각각 x_1, x_2 위치에 놓았을때, 두 센서 위치에서의 자기장의 차이는 다음과 같다.

$$\Delta B_x = \frac{\mu_0 NIa^2}{2} \left[\frac{1}{(x_1^2 + a^2)^{3/2}} - \frac{1}{(x_2^2 + a^2)^{3/2}} \right] \quad (12)$$

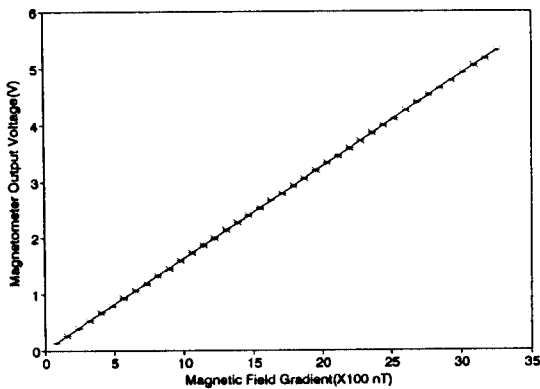


Fig. 6. The linearity of the constructed magnetometer.

자장 기울기 측정용 플럭스게이트 마그네토미터의 선형도 측정은 자기장 구배 발생장치로부터 두 센서를 각각 40

cm, 70 cm의 위치에 놓고, 자기장 구배 발생장치에 정현파의 전류를 공급하고 두 센서 위치에서의 자기장차에 따른 마그네토미터의 출력전압을 측정하였다. Fig. 6은 이때 마그네토미터의 선형도로 그래프상의 실선은 측정 데이터를 최소 자승법에 의하여 구한 결과이고 마그네토미터의 선형도는 0.1 % 이상이었다.

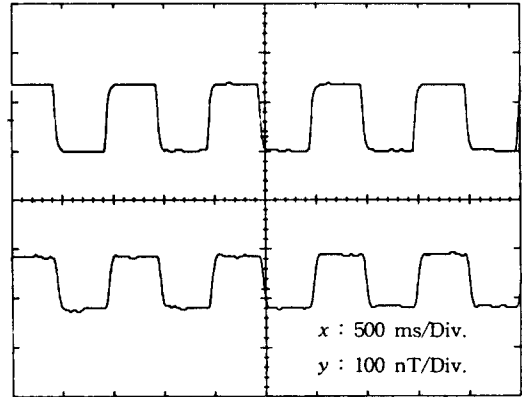


Fig. 7. The response of the constructed magnetometer under magnetic field difference of 100 nT ; below and above curves represent applied magnetic field gradient and magnetometer response respectively.

Fig. 7은 두 센서를 자기장 구배 발생장치로부터 각각 1 m, 1.3 m의 위치에 놓고 자기장 구배 발생장치에 1 Hz의 각형파를 넣어주어 자기장의 차이가 100 nT일 때의 마그네토미터의 반응으로 상단의 파형은 마그네토미터의 반응이고, 하단의 파형은 자기장 구배 발생장치의 코일에 흐르는 전류로부터 계산된 전압의 파형이다. 한편 마그네토미터의 노이즈는 1 Hz 주파수 대역폭에서 1 nT 정도였다.

두 센서코어의 자기적 특성이 같지 않을 경우 외부 자기장에 의한 두 코어의 자기이력곡선의 변화가 다를 경우 직류 바이어스 자기장에 의한 마그네토미터의 출력 오차를 발생하므로 외부 자기장의 크기에 따른 마그네토미터의 출력전압을 측정하였다. 두 센서코어는 자화방향을 동일하게 하고, 자기장 구배 발생장치로부터 같은 위치에 놓은 뒤 외부 자기장의 크기를 변화시키면서 마그네토미터의 출력전압을 측정하였다. Fig. 8은 외부 자기장의 크기에 따른 마그네토미터의 출력전압을 측정된 결과로 외부 자기장의 크기가 1 μ T 이하인 영역에서는 마그네토미터의 출력전압의 변화가 거의 없었으며, 지구자기장 정도의 크기인 50 μ T 이하인 영역에서 약 60 nT의 출력전압

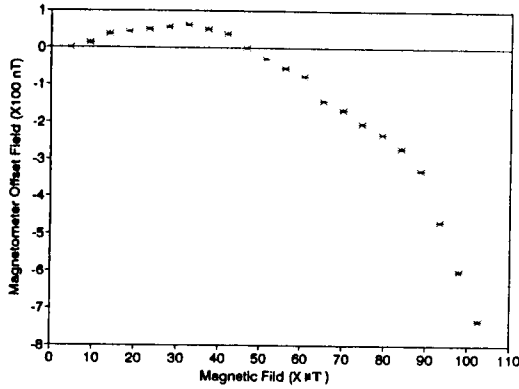


Fig. 8. Output voltage variation of the magnetometer due to the external dc bias magnetic field.

의 변화가 생겼고, 그 이상의 자기장에서는 비교적 큰 변화가 발생하였다.

V. 결 론

본 연구에서 제작한 자기장 차이 측정용 플럭스게이트 마그네토미터의 민감도는 1.6×10^6 V/T였고, 선형도는 0.1 % 이상 이었다. 또한 마그네토미터의 분해능은 1 Hz 주파수 대역폭에서 1 nT로 측정되었다. 두 센서코아의

자기적인 특성차에 의한 마그네토미터의 출력전압의 변화는 측정하는 외부 자기장의 크기가 1 μT 이하에서는 거의 변화없이 일정하였으며, 지구자기장 50 μT 이하에서 약 60 nT의 변화를 보였고, 그 이상에서는 비교적 큰 변화를 보였다.

본 연구에서는 위와 같은 특성을 가지고, 두 센서 위치에서 외부 자기장의 차이를 20 kHz의 측정속도로 측정할 수 있는 자기장 기울기 측정용 플럭스게이트 마그네토미터를 제작하였다.

참 고 문 헌

- [1] N. F. Ness, Space Science Review, 11, pp. 459 (1970).
- [2] E. J. Smith et al. , IEEE, GE-14, pp. 154 (1976).
- [3] D. Son, IEEE MAG-25, pp. 3420(1989).
- [4] G. D. Adams, Rev. Sci. Ins., 21, pp. 69(1950).
- [5] J. Greiner, Nachrichtentech., 10, pp. 156 (1960).
- [6] W. A. Geyger, Trans. AIEE(Commun. Electron.), 81, pp. 65(1962).
- [7] D. Son, Ph. D thesis, 1990, Univ. der Bundeswehr Hamburg.

Construction of a Fluxgate Magnetometer for the Measurement of Magnetic Field Difference

K. W. Choi, D. Son, and Y. Cho

Dept. of Physics, Han-Nam University

Ojung-Dong 133, Taejon 300-791

(Received 17 April 1995, in final form 2 August 1995)

In order to measure magnetic field difference, we have constructed a fluxgate magnetometer which is based on the measurement of apparent corecive field strength from the magnetizing current of two sensors. Co-based amorphous ribbon, which has square shape of ac hysteresis loop, was used as core material. Two sensors have 315 turns of the primary and the secondary windings respectively, and core size of 2 mm wide and 30 mm long. The primary windings are connected parallel to measure external magnetic field difference and the secondary windings serially for the averaged magnetic induction of the cores. The constructed magnetometer could measure magnetic field difference with sensitivity of 1.6×10^6 V/T and resolution of 1 nT at 1 Hz bandwidth.