

마이크로컴퓨터를 이용한 자체 보상형 flux-gate 마그네토미터제작

가은미 · 손대락*

한남대학교 물리학과
대전광역시 대덕구 오정동 133

손동환

국방과학연구소
경남 진해시 우체국 사서함 18호

(2002년 7월 29일 받음, 2002년 8월 20일 최종수정본 받음)

지구자기장 이하의 저자기장 측정에 있어서 소형이고 소비전력이 작으면서 장기적 안정성이 요구되는 분야에 flux-gate 마그네토미터를 많이 사용하고 있다. 또한 많은 저자기장 측정분야가 지구자기장의 크기측정보다는 지자장의 변화를 측정하는 경우가 많기 때문에, 본 연구에서 측정범위가 $\pm 1,000$ nT, 분해능이 $5\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (at 1 Hz)인 flux-gate 센서를 사용 $\pm 50,000$ nT인 지구자기장을 순차적 근사법으로 보상한 후 지구자기장의 변화를 고감도로 측정할 수 있는 3-축의 flux-gate 마그네토미터를 개발하였다.

주제어 : 마그네토미터, flux-gate, 저자기장 측정

I. 서 론

Flux-gate 마그네토미터는 2차 세계대전을 전후로 개발되었으며, 오늘날까지 지구자기장의 측정 및 항공·우주분야 등에 널리 사용되고 있는 저자기장을 측정하는 원리중의 하나이다[1-3]. 그 원리는 코어를 교류자기장으로 포화시키고 일차코일에 흐르는 전류의 파형이나 이차코일에 유도되는 기전력의 파형에 피 측정 자기장에 의하여 발생하는 고조파(higher harmonics)성분을 측정한다. Flux-gate 원리가 오늘날 널리 사용되고 있는 이유는 코어를 교류 자화시키는 과정에서 포화 자화시키기 때문에 불안정한 자구의 변화에 의한 offset값의 변화가 매우 적으며, 최근 비정질 코어 등의 개발로 자화 주파수를 높임으로써 센서의 감도를 높일 수 있고, 저전력의 각종 IC가 개발됨에 따라 소형이고 저 전력 손실되면서 장기적인 신뢰성이 매우 우수한 flux-gate 마그네토미터의 개발이 가능하여졌다. 저자기장 측정에 사용되는 flux-gate 마그네토미터의 경우 피 측정 지구자기장의 크기를 측정하는 경우보다 피 측정 지구자기장의 변화만을 측정하는 경우가 많기 때문에[4], 본 연구에서는 지구자기장의 변화만을 고감도로 측정할 수 있는 flux-gate 마그네토미터를 개발하기 위하여, 피 측정 자기장을 측정하고, 그 크기와 같고 방향이 반대인 자기장을 솔레노이드를 사용하여 보상하는 자체보상(self compensating)방법을 택하였다. 또한 측정범위가

적은 고감도의 flux-gate 마그네토미터를 사용하여 큰 범위의 피 측정자기장을 보상하는 방법은 DAC를 사용하여 ADC를 구현하는 방법 중의 하나인 순차적 근사법(successive approximation)을 도입하였다[5].

II. 마그네토미터 제작

2.1. 센서 제작

Flux-gate마그네토미터의 원리는 2차 코일에 유도되는 기전력의 2차 고조파 성분을 측정하는 방법을 선택하였다. 센서

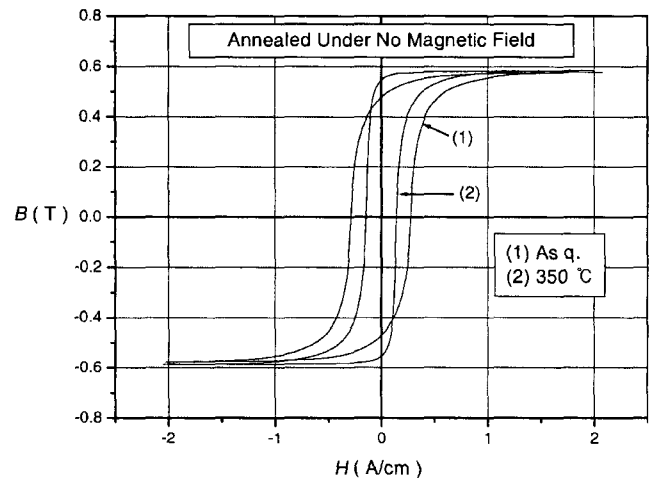


Fig. 1. AC hysteresis loops of amorphous ribbons; as quenched and annealed at 350 °C during 1 hr.

*Tel: (042)629-7512, E-mail: deracson@mail.hannam.ac.kr

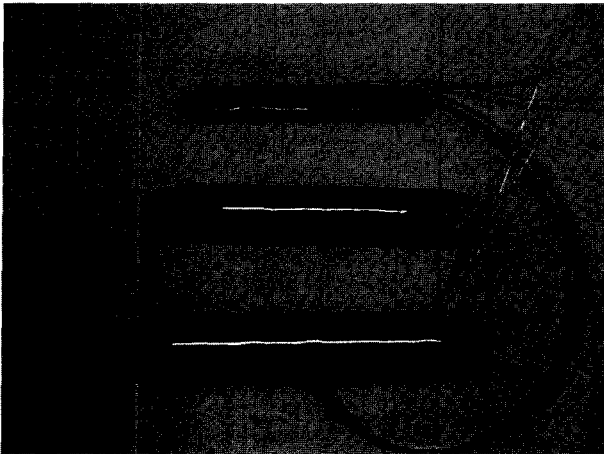


Fig. 2. Photography of the core and primary winding for magnetizing core(upper), search coil for sensing magnetic flux(middle), and compensating coil for earth magnetic field(bottom).

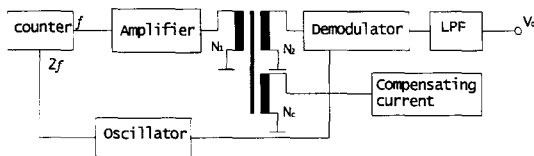


Fig. 3. Block diagram of the electronic circuit for the flux-gate magnetometer.

의 감도를 향상시키기 위해서는 센서 코어의 자화 주파수를 높여야한다. 이를 위하여 높은 자화 주파수에서도 철손이 적은 비정질 코어를 사용하였다. 비정질 코어는 Honeywell사의 Co-계 비정질 합금인 MATGLASS 2714A를 폭이 3 mm로 슬리팅한 후 350 °C에서 1시간 열처리하여 사용하였다. Fig. 1은 as quenched 상태와 열처리한 후의 비정질 리본을 자화 주파수 25 kHz에서 측정된 ac B-H 곡선으로 열처리를 함으로써 보자력을 감소시키고 자기이력곡선의 각형성이 많이 향상됨을 알 수 있다. Flux-gate센서의 자화 코일은 직경이 0.2

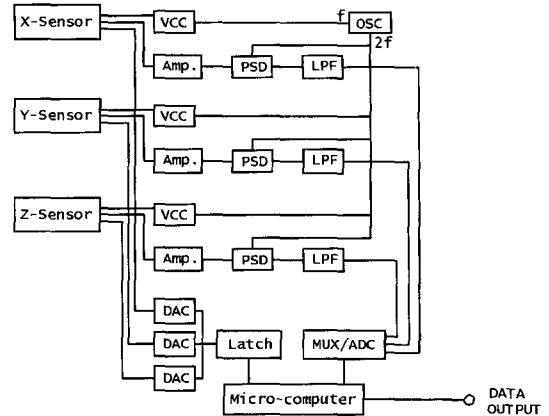


Fig. 5. Block diagram of the 3-axis self compensating type flux-gate magnetometer.

mm인 에나멜 동선을 양쪽에 각각 34 mm의 코일포머에 129 회씩 권선하여 직렬로 연결하였으며 2차 코일은 직경이 0.1 mm인 코일을 46 mm의 코일포머에 1018회 권선 하였다. 또한 지구자기장을 보상하기 위한 코일은 직경이 0.2 mm인 코일을 46 mm의 코일포머에 311회 권선 하였으며, 제작된 센서의 사진은 Fig. 2와 같다.

2.2. 신호처리 장치 제작

Flux-gate마그네토미터의 신호처리를 위한 전자회로는 Fig. 3과 같이 발전기에서 발생한 $2f(f = 10 \text{ kHz})$ 신호를 계수기를 사용하여 주파수 f 신호로 변환한 후 증폭기를 거쳐서 일차 코일에 연결함으로써 코어를 자화시켰다. 이차코일에 유도되는 전압의 2차 고조파성분($2f$)만을 측정하기 위하여 검파기(demodulator:AD630)를 사용하였다.

제작된 flux-gate 마그네토미터를 교정하기 위해서 Helmholtz코일을 사용하였으며, 코일의 반경은 각각 48.5 cm, 42.9 cm, 37.3 cm이었으며, 코일 상수는 각각 $1.69 \times 10^{-4} \text{ T/A}$, $1.87 \times 10^{-4} \text{ T/A}$, $2.12 \times 10^{-4} \text{ T/A}$ 였다. Flux-gate마그네토미터를

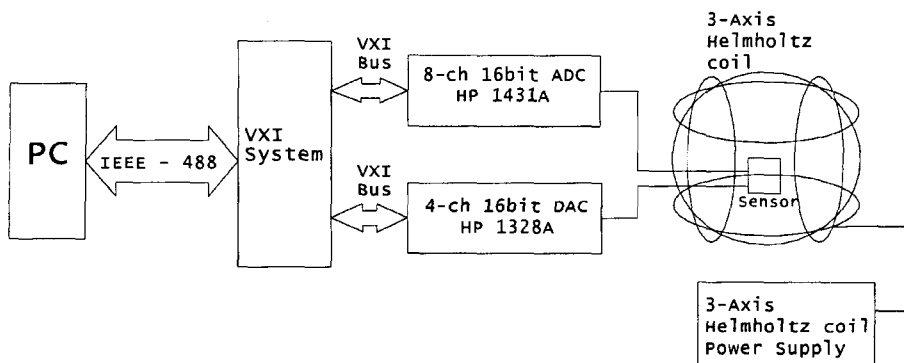


Fig. 4. Schematic diagram for the flux-gate magnetometer calibration system using 3-axis Helmholtz coil.

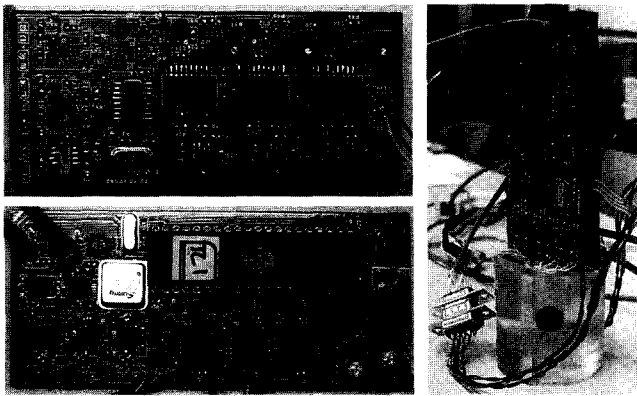


Fig. 6. Photography of the constructed 3-axis flux-gate magnetometer.

교정하는 장치의 개략도는 Fig. 4와 같다. 제작된 flux-gate마그네토미터의 특성은 피측정 자기장이 $\pm 1,000$ nT에서 센서 출력이 ± 10 V가 되도록 센서를 교정하였다.

교정된 flux-gate마그네토미터를 사용하여 $\pm 50,000$ nT 지구자기장을 순차적 근사법(successive approximation)을 이용하여 보상하기 위하여 단일 칩 마이크로컴퓨터 IC를 사용하였다. 3축의 flux-gate 마그네토미터의 신호처리 장치 및 구조도는 Fig. 5와 같이 구성하였다. 3축의 아날로그 센서 출력을 multiplexer와 20 bit의 ADC를 이용하여 마이크로컴퓨터에 입력하고, 피측정 자기장 보상을 위한 전압은 3개의 DAC를 사용하였다. 제작된 신호처리장치 및 센서의 사진은 Fig. 6과 같으며 센서는 직경 5 cm, 길이 15 cm의 캡슐에 모두 들어가게 하였다. 한편 측정된 3축의 자기장 값은 먼 거리 유선통신이 가능한 RS422 인터페이스 방식을 이용하여 컴퓨터로 데이터를 보내게 하였다. Fig. 7은 윈도상에서 나타날 수 있게 개발한 센서구동용 소프트웨어이다. 이 소프트

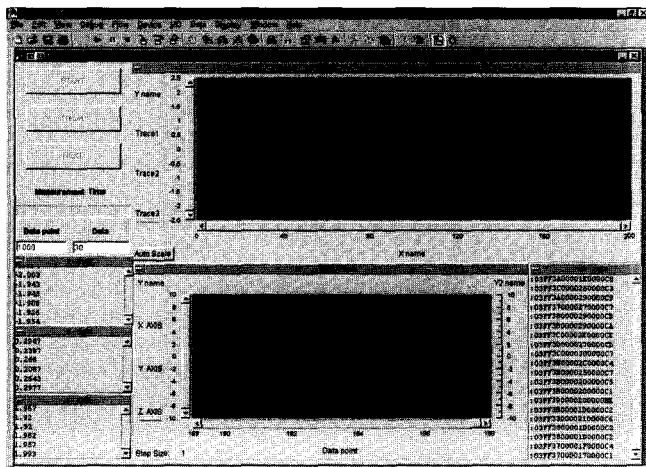


Fig. 7. Developed software for flux-gate magnetometer control and for displaying measured magnetic field.

웨어를 사용하여 센서를 유선으로 reset할 수 있고 또한 측정된 3축의 데이터를 strip chart 방식으로 화면에서 볼 수 있게 하였다.

III. 마그네토미터의 특성 측정

제작된 flux-gate마그네토미터의 특성을 조사하기 위하여 6층의 자기차폐장치를 사용하였다. Fig. 8은 자기차폐장치 내에서 측정된 flux-gate마그네토미터의 노이즈 스펙트럼으로, 그 크기는 1 Hz에서 $5\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 정도였다. 또한 마그네토미터의 시간에 대한 안정성을 조사하기 위하여 자기차폐장치 내에서 flux-gate마그네토미터를 1,000초 동안 측정된 결과가 Fig. 9이다. Fig. 9에서 보면 자기차폐장치 안에서도 일반적으로 수백 nT의 dc 자기장이 있으나 이를 수 nT 이하로 보상하였음을 보여주고 있으며, 1,000초 동안 마그네토미터가 \pm nT 이하의 안정성을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 시간영역에서 노이즈를 보기 위하여 Fig. 9의 x-, y-축성분의 처음 50초 동안을 확대하여 그린 것이 Fig. 10으로 시간영역에서

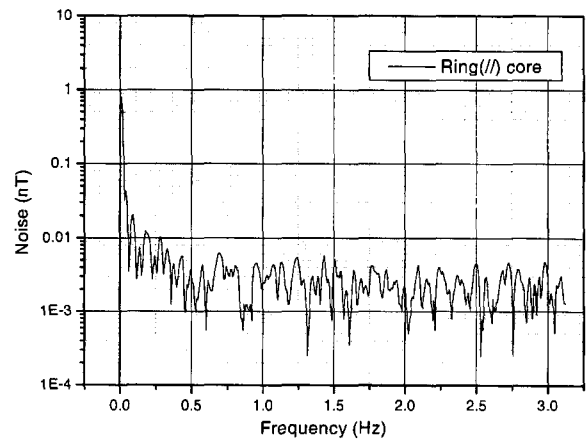


Fig. 8. Noise spectrum of the developed flux-gate magnetometer.

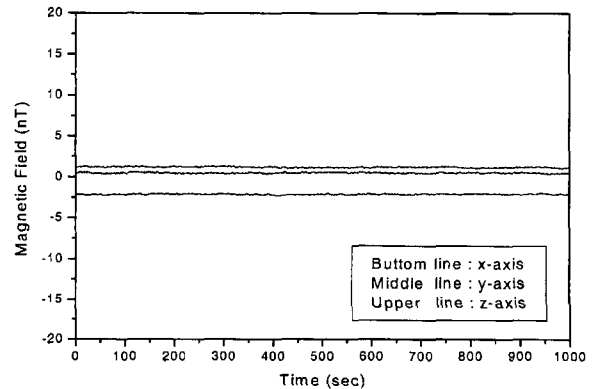


Fig. 9. Short term stability of the developed flux-gate magnetometer.

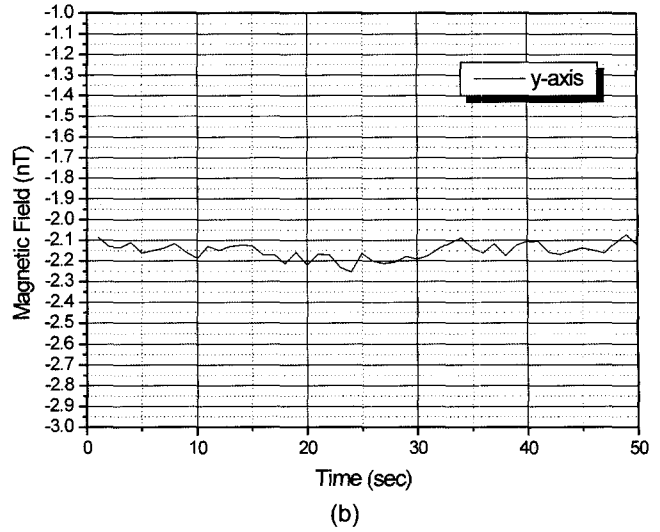
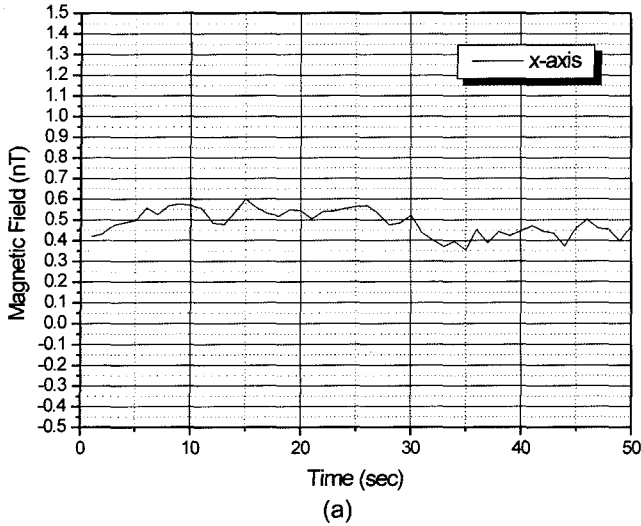


Fig. 10. Magnetometer noise level in time domain; (a) x-axis and (b) y-axis.

flux-gate 마그네토미터가 ± 0.1 nT 이하로 안정되어 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 지구자기장의 변화를 보다 높은 감도로 측정하기 위하여 측정범위가 $\pm 1,000$ nT인 고감도의 flux-gate 센서와 마이크로 컴퓨터를 이용하여 순차적 근사법으로 지구 자기장을 보상하는 방식의 마그네토미터를 개발하였다. 개발한 flux-gate 마그네토미터는 분해능이 1 Hz에서 $5\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 였으며 1,000초 동안의 단기적 안정성은 1 nT 이하로 우수한 특성을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] H. Aschenbrenner, Hoch frequenztechnik Und Electroakustik, **44**, 2(1934).
- [2] F. Forster and Z. Metallkde, **46**, 358(1955).
- [3] D. I. Gordon, "Methods of Measuring the Magnetic Field", IEEE Trans. on Magn., MAG-8, 48(1972).
- [4] W. F. Stuart, "Earth Field Magnetometry", Rep. Prog. Phys., **35**, 803(1972).
- [5] Malmstadt and Enke, "Electronics and Instrumentation for Scientist", Benjamin/Cummings Publishing Co., Menlo Park, 383(1981).

Self Compensating Flux-gate Magnetometer Using Microcomputer

E. M. Ga, D. Son*

Dept. of Physics, Hannam University, Ojung dong 133, 300-791 Daejon Korea

D. H. Son

Agency for Defense Development, P.O. Box 18, Chinhae, 645-600 Kyungnam

(Received 29 July 2002, in final form 20 August 2002)

Flux-gate magnetometer has been still used for low field magnetic field measurement with portability, low power consumption, and high reliability. In many applications, flux-gate magnetometer measures not absolute values but changes of the earth magnetic field. For the earth magnetic field change measurements, we have constructed a high sensitive 3-axis flux-gate magnetometer of which measuring ranges is ± 1000 nT and noise level is $5\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz. Using this magnetometer, we can compensate the earth magnetic field of $\pm 50,000$ nT with successive approximation methods using microcomputer. After earth magnetic field compensation, we could measure earth magnetic field changes with ± 100 nT measuring ranges.

Key words : Magnetometer, Flux-gate magnetometer, Low magnetic field, Earth magnetic fields