≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society, Volume 20, Number 5, October 2010 DOI: 10.4283/JKMS.2010.20.5.178

# 차동형 탐지코일 마그네토미터 제작

김종호 · 손대락*
한남대학교 광전자물리학과, 대전시 대덕구 오정동 133, 306-791

(2010년 7월 30일 받음, 2010년 9월 2일 최종수정본 받음, 2010년 9월 3일 게재확정)

탐지코일 마그네토미터는 고감도의 교류자기장 측정용으로 많이 사용되어 왔다. 본 연구에서는 센서코어의 자기소거인자를 감소시키고, 센서의 S/N ratio를 증가시키기 위하여 코어를 2개로 분리하고 각각의 코어에 코일을 권선하였으며, 코일의 연결은 차동형이 되게 하였다. 제작된 탐지코일 마그네토미터의 선형도는 0.03 % 이였으며, 감도가 9.3 mV/nT이고, 분해능은 1 Hz에서 20 pT 정도였다.

**주제어** : 마그네토미터, 탐지코일, 저자기장측정, 교류자기장측정, 자기센서

## I. 서 론

저자기장 측정기술은 지구자기장 및 그 변화의 측정과 태양에 의한 자기폭풍의 측정 등 다양한 분야에서 사용되고 있다[1, 2]. 탐지코일 마그네토미터(search coil magnetometer)는 Faraday의 전자기 유도 법칙을 이용하여 저자기장을 측정하는 센서로써 피 측정 자기장이 직류인 경우 탐지코일을 회전시켜서 탐지코일에 유도되는 기전력을 이용하여 자기장을 측정하는 방법[3]과 피측정 자기장이 교류자기장일 경우 코일에 유도되는 기전력을 증폭기로 증폭하여 자기장을 측정하는 방법이다. 탐지코일 마그네토미터는 대부분 피 측정 자기장이 교류일 때 측정하는 방법으로 사용하고 있으며 측정주파수 영역이 수 mHz~수 kHz범위에 많이 사용되고 있다[4]. 대표적인 응용분야로는 지구자기장 변화관측용[5], 물체의 이동에 의한 자기장변화의 탐지 및 SQUID마그네토미터가 개발되기 전에는 심장에서 발생하는 자기장(심자도)측정에도 사용되었다[6].

본 연구에서는 먼 거리에서 자동차나 강자성체를 지닌 사람이 이동하는 것을 효과적으로 탐지하기 위하여 탐지코일과 신호증폭기와의 거리가 먼 경우 발생되는 common mode noise를 줄이고, 코어의 자기소거인자를 줄이기 위하여 코어를 2개로 분리하여 권선을 하여, 탐지코일의 신호를 differential mode로 전송할 수 있는 차동형 탐지코일 마그네토미터의 개발에 관하여 연구를 하였다.

## II. 센서의 원리 및 제작

탐지코일 마그네토미터는 Faraday's의 전자기유도법칙을 이용한다.

$$v(t) = -\frac{d\phi}{dt} = -NA\frac{dB}{dt} \tag{1}$$

여기서 $N$은 코일의 권선 수 $A$는 코일의 유효단면적이다.

센서의 감도(sensitivity)를 증가시키기 위하여 투자율이 높은 코어를 넣는데, 이 경우 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$v(t) = -NA_c\mu_c\frac{dB}{dt} \tag{2}$$

여기서 $A_c$는 코어의 단면적이고, $\mu_c$는 코어 유효 상대투자율로

$$\mu_c = \frac{\mu_r}{1 + N_d(\mu_r - 1)} \tag{3}$$

이다. 여기서 $\mu_r$은 코어의 상대 투자율, $N_d$는 코어의 자기소거인자(demagnetizing factor)이다[4]. 식(3)에서 보면 센서의 감도를 향상시키기 위해서는 $\mu_c$를 크게 하여야하고, 그렇게 하려면 코어의 상대 투자율이 큰 재료를 사용하면서 코어의 형상은 자기소거인자를 가능한 적게 하여야한다. 자기소거인자를 적게 하기위해서는 같은 부피의 코어에서는 단면적을 줄이고 코어의 길이를 크게 하면 된다. 그러나 많은 경우 사용용도에 따라 센서의 길이에 제한을 받기 때문에 일반적으로 길이는 사용용도에 따라 정하여진다. 일반적인 탐지코일 마그네토미터는 1개의 코어에 코일을 권선하여 사용한다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 2개의 코어에 각각 코일을 권선하고, 비자성의 부도체를 사용, 두 코어사이의 간격을 적절히 분리시켜 코어상호간의 자기적 작용을 줄이면 코어의 자기소거인자가 감소하게 된다. 따라서 두 코어의 단면적을 합한 단면적의 단일 코어일 때의 자기소거인자보다 적기 때문에 식(3)에서와 같이 코어의 유효상대투자율이 단일 코어일

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

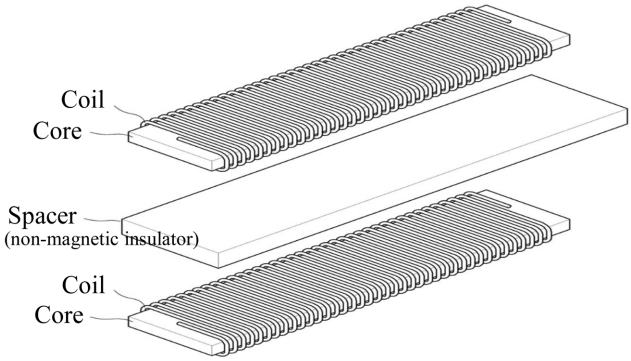


**Fig. 1.** Coil configuration of differential type search coil magnetometer.

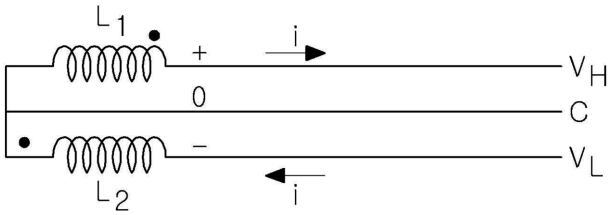


**Fig. 2.** Electrical connection of differential type search coil magnetometer.

때 보다 증가하게 되어 탐지코일 마그네토미터의 감도를 향상시킬 수 있다. 또한 2개 코일의 극성을 Fig. 2와 같이 차동형(differential type)으로 연결할 경우, 신호선의 길이가 길어질 때 발생하는 전기 noise 인 common mode noise를 많이 감소시킬 수 있다. 센서의 신호증폭은 차동형 증폭기인 계측증폭기(instrumentation amplifier)를 사용 하였으며, 본 연구에서 개발하려는 센서가 자동차나 강자성체를 지니고 있는 사람의 이동을 측정하는 것이 목적이고, 60 Hz의 교류자기장의 의한 신호을 차단하기 위하여 차단주파수가 5 Hz인 40 dB/decade의 Butterworth 저주파수대역필터를 사용하였다. 측정신호를 컴퓨터에 보여주기 위하여 필터를 통과한 아날로그 신호를 microcontroller 인AVR(ATtiny2313)을 사용하여 24 bit ADC(ADS1253)를 제어하였으며, 아날로그신호를 디지털신호로 변환시킨 값을 RS232C interface로 컴퓨터에 데이터를 전송할 수 있게 하였다. Fig. 3은 본 연구에서 제작된 탐지코일 마그네토미터의 사진으로 센서코어는 Co-계 비정질 코일을 열처리하여 사용하였으며 코어는 폭이 5 mm, 두께 2 mm 및 길이가 120 mm에 직경 0.1 mm인 에나멜동선을 각각의 코어에 10,000회 권선을 하여 알루미늄하우징에 넣어 에폭시로 몰딩을 하였다.

## III. 센서의 특성 측정

제작된 탐지코일형 마그네토미터의 선형도와 측정주파수대역폭을 측정하기 위하여 코일 상수가 $4.74 \times 10^{-4}$ T/A인 솔레노이드와 함수발생기를 사용하였고, 솔레노이드에 흘려주는 전류는 정확도 0.1 %, 1 kΩ 정밀저항을 사용하였으며, 측정장치의 개략도는 Fig. 4와 같다. 측정방법은 파형발생장치인 waveform synthesizer를 사용 측정하고자 하는 주파수를 설정하고 출력전압의 크기는 shunt 저항 $R_s$에 양단에 걸리는 전압으로부터 측정된 전류 값과 솔레노이드의 코일상수 값을 곱한 값이 측정하고자하는 자기장이 되게 조절하였다. Fig. 5는 2 Hz의 교류자기장을 0에서 100 $nT_{rms}$까지 10 $nT_{rms}$ 간격으로 인가하면서 탐지코일 마그네토미터의 출력 값 $V_{rms}$를 측정한 결과로 감도는 9.3 mV/nT 였고, 선형도는 0.03 %였다. 또한 탐지코일마그네토미터의 측정주파수 대역폭을 측정하기 위하여, 솔레노이드에 발생되는 자기장의 크기가 100 $nT_{rms}$이고, 주파수를 0.2~50 Hz까지 변화시키면서 센서의 출력 값을 측정 한 결과가 Fig. 6이다. 5 Hz 이상의 교류자기장에 대하여 신호의 크기가 줄어드는 것은 앞장에서 언급한 40 dB/decade의 저주파수대역필터를 사용한 결과이며, 60 Hz의 교류자기장을 차단하기 위함이다. 이는 본 연구의 목적이 자동차나 강

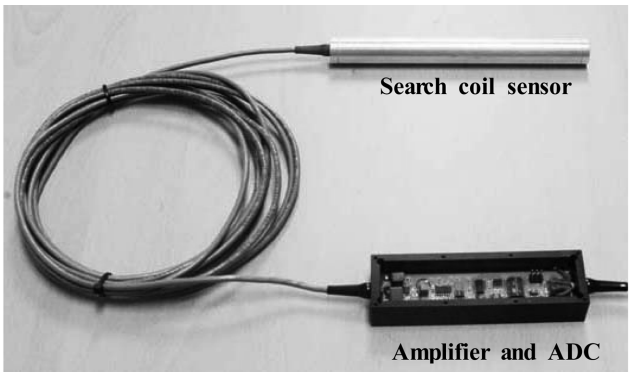


**Fig. 3.** Photography of the constructed differential type search coil magnetometer.

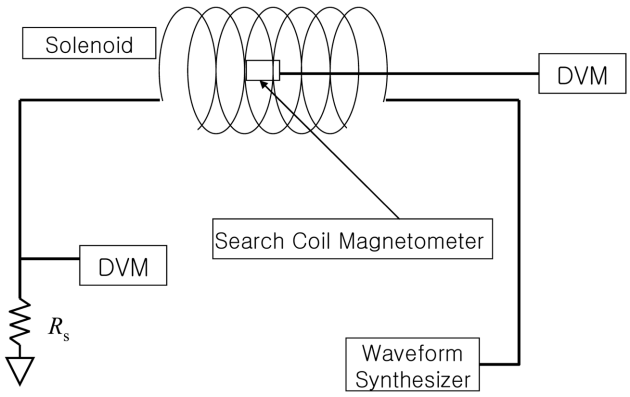


**Fig. 4.** Schematic diagram of calibration system for the search coil magnetometer.

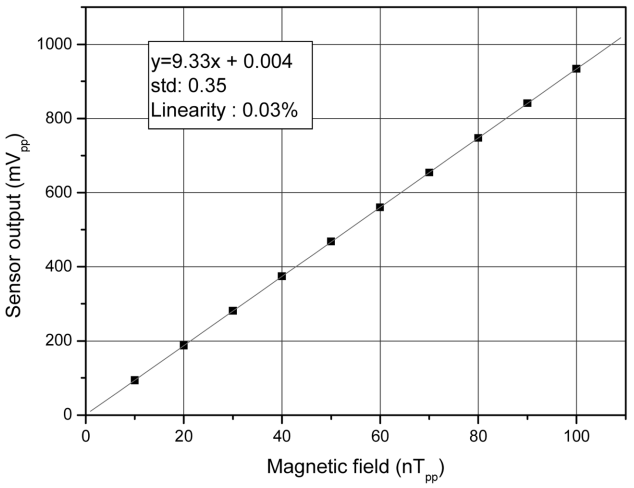


**Fig. 5.** Sensor output voltage when 2 Hz ac magnetic field is applied using solenoid to demonstrate linearity of the developed search coil magnetometer.

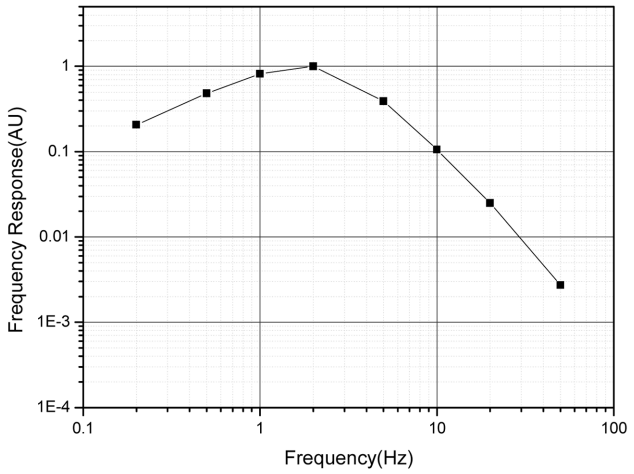


**Fig. 6.** Frequency bandwidth of the developed search coil magnetometer.

자성체를 지닌 사람이 이동하는 것을 감지하는 것이고, 전력장치 등에서 발생하는 전력주파수영역의 자가장을 신호를 차단하여야 되기 때문이다. Fig. 7은 차폐율이 100 dB 이상인 다중 자기장차폐장치에 개발된 탐지코일 마그네토미터센서를 넣은 후, noise spectrum을 측정한 결과이다. Dc에서 2 nT$_{rms}$ 값을 보여주고 있는데 이는 증폭기 출력의 offset 값으로, 본 연구에서는 교류자기장만을 측정을 하기 때문에 측정 소프트웨어에서 이 값을 빼어 버리는 방식을 택하였다. Dc~3 Hz 범위에서 마그네토미터의 noise 크기는 20 pT$_{rms}$ 이하였으며, 이는 20 pT$_{rms}$ 이상의 자기장 변화를 감지할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 탐지코일 마그네토미터의 출력 값을 PC모니터 상에 보여주기 위하여 LabVIEW로 개발한 측정프로그램창이다. Fig. 8의 오른쪽 파형은 실험실 내에서 0.1 nT의 자기장 변동

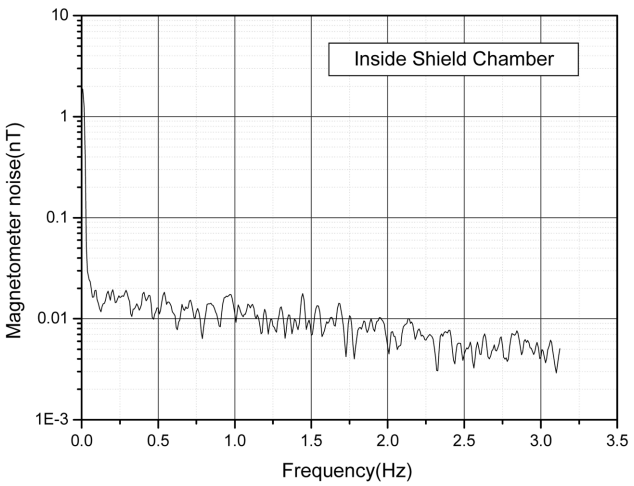


**Fig. 7.** Noise spectrum of the developed search coil magnetometer.

**Fig. 8.** LabVIEW display panel of search coil magnetometer.

을 보여주고 있으며, 왼쪽은 조그만 강자성체의 이동에 의한 탐지코일마그네토미터의 출력변화를 보여주고 있다.

## IV. 결　　론

본 연구에서는 센서코어를 2개로 분리시켜 각각의 코어에 코일을 권선함으로써 코어의 자기소거인자를 감소시키고, 2개의 코일 극성이 서로 직렬이 되게 연결하여 차동형으로 신호를 증폭 할 경우 신호선이 길어도 고감도로 자기장 변화를 측정할 수 있는 차동형 탐지코일마그네토미터를 제작하였다. 제작된 마그네토미터는 선형도가 0.03 %, 감도가 9.3 mV/nT 이고, 분해능은 1 Hz에서 20 pT 정도였다.

## 감사의 글

이 논문은 2010년 한남대학교 학술연구비로 지원되었음.

## 참고문헌

[1] X. H. Cao and D. Son, J. Magnetics **14**, 129 (2009).
[2] 이문호, 한국자기학회지 **20,** 52 (2010).
[3] T. C. Penn and F. G. West, Rev. Sci. Instrum. **35**, 1361 (1964).
[4] W. Goepel, J. Hesse, and J. N. Zemel, Sensors Vol. **5**, VCH, New York (1989) pp. 206~253.
[5] R. C. Snare et al., IEEE Trans. Geoscience and Electronics. **GE-10**, 127 (1972).
[6] K. Estola et al., J. Phys. E Sci. Instrum. **15**, 1110 (1982).

# Construction of Differential Type Search Coil Magnetometer

**J. H. Kim and Derac Son***
*Dept. of Physics, Hannam University, Ojung Dong 133, Daejeon 306-791, Korea*

(Received 30 July 2010, Received in final form 2 September 2010, Accepted 3 September 2010)

Search coil magnetometer has been used for detection of ac magnetic field with high sensitivity. To reduce demagnetizing factor of core and increase S/N ratio of search coil magnetometer, the core was divided by two parts and coil was wound on each cores. Two coils were connected serially and put into amplifier as differential mode. Constructed 120 mm length search coil magnetometer shows linearity of 0.03 %, sensitivity of 9.3 mV/nT, and resolution of 20 pT at 1 Hz.

**Keywords :** magnetometer, search coil, low magnetic field measurement, ac magnetic field measurement, magnetic sensor