

## 교류 자기센서 특성 시험장치 설계에 관한 연구

정현주<sup>\*,1)</sup> · 양창섭<sup>1)</sup> · 정우진<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제6기술연구본부

### A Study on the Measurement System Design for Measuring Properties of AC Magnetic Field Sensor

Hyun-Ju Chung<sup>\*,1)</sup> · Chang-Seob Yang<sup>1)</sup> · Woo-Jin Jung<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 26 August 2014 / Revised 7 April 2015 / Accepted 17 April 2015)

#### ABSTRACT

This paper describes design and construction results of the measurement system developed on the purpose of measuring properties of AC magnetic field sensors used in the weapon system. The system for measuring the properties of AC magnetic field sensors consist of 3-axis helmholtz coil, signal generator, signal amplifier, sensor data acquisition unit and AC magnetic field sensor property measurement & analysis equipment including the operating software. By using this system, we can measure various properties of AC magnetic field sensor such as sensitivity, linearity and dynamic response in the frequency from 1 Hz to 10 kHz. Finally we also verified its performance by measuring the property of a MAG 639, standard magnetic field sensor of bartington instruments, with the developed measurement system.

Key Words : AC Magnetic Field Sensor(교류 자기센서), Measurement System(측정 시스템), 3-axis Helmholtz Coil(3축 헬름홀츠 코일)

#### 1. 서론

천해와 같이 수중 음파 전달 특성이 복잡하여 표적에서 발생하는 음향 신호만으로 표적을 탐지하고 식별하는 것이 어려운 환경에서는 근 거리에서 표적을 탐지하고 식별하기 위한 방안으로 기뢰, 어뢰 및 감시

체계 등과 같은 수중 무기체계에 자기센서가 탑재되어 운용되고 있다. 이전에는 수중 무기체계에 적용되는 자기센서가 강자성 재질의 표적으로부터 발생하는 정 자기장 신호만을 주로 탐지하였지만, 최근 탈자(Deperming) 및 소자(Degaussing) 등과 같이 표적 함정의 자기(磁氣) 스텔스 능력이 지속적으로 발전함에 따라서 정 자기장 신호만으로 표적을 정확히 탐지하는 것이 점점 어려워지고 있다<sup>1)</sup>.

이러한 함정에서의 자기 스텔스 능력 향상에 대항

\* Corresponding author, E-mail: hyunju30@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

하기 위해 최근 선진국들에서는 지구자기장의 수십만분의 일의 크기에 해당하는 미세한 자기장 신호의 변화까지 정밀 계측할 수 있는 고성능 정 자기장(Static Magnetic Field) 탐지용 자기센서를 이미 개발하였으며, 수중에서 함정 내의 전력기기 혹은 선체 부식관련 전류의 변조에 의한 교류 자기장(Alternating Magnetic Field) 영역까지도 탐지할 수 있는 교류 자기센서가 개발되어 무기체계에 탑재되고 있는 현실이다<sup>[2-4]</sup>. 더욱이 수중 유도 무기체계의 경우, 최 근접 위치에서 대상 표적을 공격하고, 표적으로부터의 기만책에 대응하기 위한 방법으로, 특정 주파수 대역에 해당하는 교류 자기장을 송신하고, 송신 자기장에 의해 표적 표면에서 발생하는 2차 교류 자기장을 탐지하는 능동형 근접자기센서가 개발되어 적용되고 있다<sup>[5]</sup>.

수중 무기체계에 적용하기 위한 교류 자기센서를 개발하기 위해서는 1 Hz부터 10 kHz까지의 다양한 주파수 대역에서 센서의 특성을 정확히 측정하고 분석할 수 있는 시험 능력이 필요하지만, 현재까지 국내에서는 교류 자기센서의 특성을 정밀하게 시험할 수 있는 시험 장비 및 관련 분야의 연구가 매우 미흡한 실정이었다. 따라서 국방과학연구소에서는 무기체계에 적용되는 각종 교류 자기센서의 특성 시험 및 분석이 가능한 교류 자기센서 특성 시험장치를 국내에서는 처음으로 개발하게 되었다.

본 연구를 통해 개발된 교류 자기센서 시험장치는 1 Hz ~ 10 kHz의 주파수 대역에서 3축 교류 자기센서에 대한 감도, 선형도 및 주파수 응답특성 등 다양한 분야의 성능 시험이 가능하도록 설계되었다. 그리고 개발된 시험장치를 이용하여 영국 Bartington사의 MAG639 표준 센서의 특성을 측정하였으며, 제작사에서 제시한 시험 결과 자료와 비교함으로써 본 연구를 통해 개발된 시험장치의 타당성도 검증하였다.

## 2. 교류자기센서 시험장치 설계/제작

Fig. 1은 본 연구에서 설계·제작된 교류자기센서 시험장치의 개략적인 구성을 보여주는 것으로서, 세부 장치는 3축 방향에서 표준 자기장을 시험대상 센서에 인가하기 위한 3축 Helmholtz 코일, 3축 Helmholtz 코일에 전류를 인가시켜주는 신호 발생기와 신호 증폭기, 코일에 인가되는 전류를 모니터링하기 위한 Shunt 저항, 시험대상 센서로부터의 아날로그 출력 신호와

Shunt 저항의 양단 전압을 디지털 신호로 변환하는 신호 획득장치, Helmholtz 코일 내부에 시험 자기장을 생성시키기 위한 신호 인가 명령과 신호 획득장치로부터 수집된 정보로부터 시험 대상 센서의 특성을 분석하는 운용 프로그램이 탑재된 교류자기센서 특성 측정 및 분석 장치로 구성된다.

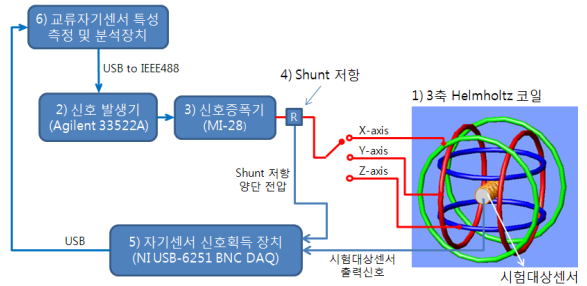


Fig. 1. Schematic diagram of the system for measuring properties of AC magnetic field sensors

3축 Helmholtz 코일은 3축 교류자기센서의 특성 시험을 위한 목적으로 설계·제작된 자기장 발생코일이다. 따라서 1 Hz부터 10 kHz까지의 주파수 범위 내에서 3축 방향의 자기장 발생이 가능해야 하고, 이때 사용되는 Helmholtz 코일의 각 축간 자기적인 직교도는 0.5° 이내여야 한다.

Helmholtz 코일에 전류를 인가하게 되면 코일의 전기적인 등가회로는 Fig. 2와 같고, 전기적인 부하 임피던스( $Z$ )는 코일의 저항과 인덕턴스 성분을 포함하게 되므로 아래 식 1과 같이 표현된다.

$$Z = R + j\omega L \tag{1}$$

여기서  $R$ 은 코일의 전기적인 저항 $[\Omega]$ 이고,  $L$ 은 코일의 인덕턴스 $[H]$ 이다.

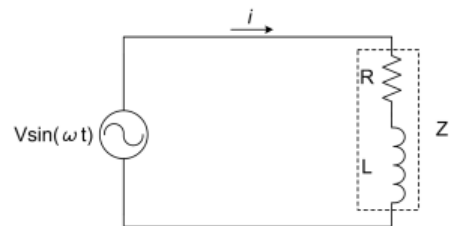


Fig. 2. Electrical equivalent circuit of a Helmholtz coil

식 (1)에서 알 수 있듯이 코일의 리액턴스( $\omega L$ )는 운용 주파수에 비례하여 증가하므로 수십 Hz 이하의 낮은 주파수에서는 코일의 리액턴스( $\omega L$ )가 전체 임피던스에서 기여하는 부분이 작은 반면, 수 kHz 이상의 높은 주파수에서는 코일의 리액턴스가 코일 저항에 비해서 매우 큰 값을 가지므로 전체 임피던스에서 기여하는 부분이 크다. 즉, 코일 양단에 인가되는 전압의 크기가 동일하다면 주파수의 증가와 함께 코일 임피던스도 증가하게 되고, 이로 인한 코일 인가 전류의 감소는 Helmholtz 코일 내부에서 발생하는 자기장을 감소시키는 결과를 초래한다. 따라서 시험 주파수와 상관없이 코일 내부 자기장을 동일한 수준으로 유지하기 위해서는 코일 양단 전압의 크기도 시험 주파수에 비례해서 증가되어야 한다. 따라서 1 Hz부터 10 kHz의 주파수 대역에서 동일한 크기의 시험 자기장을 코일 내부에 생성시키기 위해서는 10 kHz의 운용주파수에서는 코일 인가전압이 1 Hz 대비 수십 ~ 수백 배 이상이 되어야만 한다. 이는 전원장치의 출력 전압도 함께 증가되어야 하는 문제점을 가지게 된다.

코일의 인덕턴스( $L$ )는 아래 식 (2)와 같이 코일의 단면적에 비례한다.

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} \quad (2)$$

여기서,  $\mu_0$ 는 공기의 투자율,  $N$ 은 코일 권선수,  $S$ 는 Helmholtz 코일의 단면적,  $l$ 은 자로의 길이이다.

따라서 코일의 단면적을 감소시키면 코일의 전체 임피던스를 줄일 수 있다. 하지만 코일의 단면적 감소는 코일 내부에서 균일한 자기장이 생성되는 공간도 함께 감소시키므로 요구되는 시험장치의 측정 정밀도와 시험대상 센서의 크기를 고려하여 코일 단면적이 최소화되도록 설계되어야 한다.

일반적으로 교류자기센서 시험장치의 경우, 센서 측정 오차가 1 % 이내이면 양호한 편이지만 경우에 따라서는 측정 오차를 0.1 % 이내로 유지할 필요가 있다. 측정 오차를 0.1 % 이내로 유지시키기 위해서는 Helmholtz 코일 내에서 발생하는 자기장의 정확도가 99.9 % 이상이어야 하고, 시험 대상센서가 위치하는 공간의 자기장 변동율도 0.1 % 이내여야 한다. 따라서 본 연구에서는 무기체계에 적용되는 대부분의 3축 교류 자기센서의 탐지부 크기가 대략 5 cm 이내인 점을 고려하여 직경 6 cm 이상인 공간에서 자기장 변동

율이 0.1 % 이내가 되도록 Helmholtz 코일을 설계하였다. 3축 Helmholtz 코일의 내부 자기장은 아래 식 (3)과 같이 계산된다<sup>[6]</sup>.

$$B = \mu_0 \left( \frac{NI}{2a} \right) \left[ \left( 1 + \frac{(a+x/2)^2}{a^2} \right)^{-1.5} - \left( 1 + \frac{(a-x/2)^2}{a^2} \right)^{-1.5} \right] \quad (3)$$

여기서,  $B$ 는 Helmholtz 코일 중심으로부터 이격거리에 따른 자기장,  $N$ 은 코일 권선수,  $I$ 는 코일 인가 전류,  $a$ 는 코일반경,  $x$ 는 코일중심으로부터의 이격거리이다.

Table 1. The specification of 3 axis helmholtz coil

항 목		내 용
코일반경/ 코일간 이격거리	X축	Ø 240 mm / 240 mm
	Y축	Ø 192 mm / 192 mm
	Z축	Ø 288 mm / 288 mm
코일저항	X축	1.867 Ω
	Y축	1.568 Ω
	Z축	2.222 Ω
코일인덕턴스	X축	0.01847 H
	Y축	0.01409 H
	Z축	0.02333 H
코일상수	X축	335.73 μT/A
	Y축	421.61 μT/A
	Z축	281.17 μT/A
자기장 변동율	X축	< 0.1 % (직경 8.4 cm) < 1.0 % (직경 15.0 cm)
	Y축	< 0.1 % (직경 6.6 cm) < 1.0 % (직경 12.0 cm)
	Z축	< 0.1 % (직경 9.8 cm) < 1.0 % (직경 18.0 cm)
코일 직교도	XY	< 0.2 °
	YZ	< 0.2 °
	ZX	< 0.2 °

Table 1은 식 (3)을 기반으로 본 연구에서 설계·제작된 3축 Helmholtz 코일의 세부 제원을 정리한 표이다. Table 1을 바탕으로 제작된 Helmholtz 코일의 코일 중심으로부터 이격거리에 따른 내부 자기장 변동율을 식 (2)를 이용하여 각 축별로 계산하면 Fig. 3 ~ Fig. 5와 같다. 코일 직경이 가장 작은 Y축 코일의 계산 결과를 살펴보면, 직경 6.6 cm 이내에서는 모든 축의 자기장 변동율이 0.1 % 이내이고, 직경 12 cm 이내에서는 1 % 이내임을 알 수 있다. 그리고 코일 직경이 가장 큰 Z축 코일의 계산 결과를 살펴보면, 직경 9.8 cm 이내에서는 모든 축의 자기장 변동율이 0.1 % 이내이고, 직경 18 cm 이내에서는 1 % 이내임을 알 수 있다.

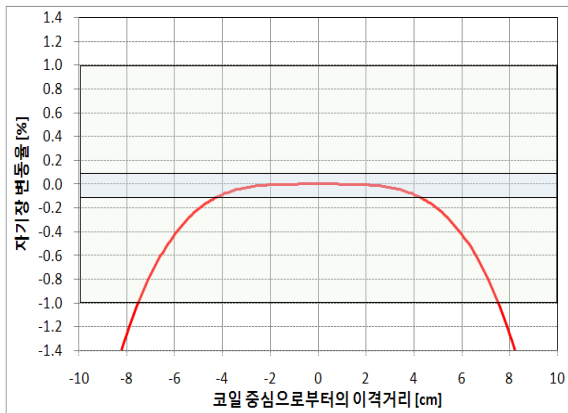


Fig. 3. The magnetic field variation on the x axis line at the center point of helmholtz coil(x axis)

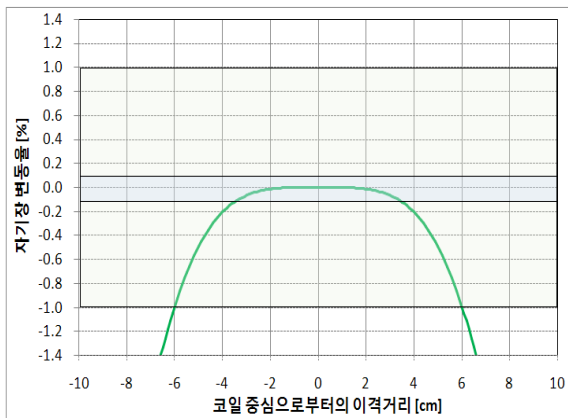


Fig. 4. The magnetic field variation on the y axis line from center point of helmholtz coil(y axis)

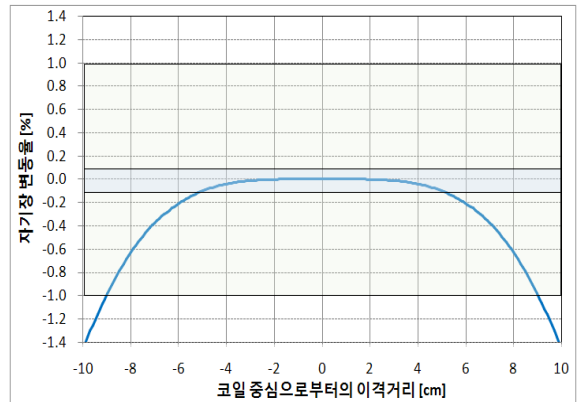


Fig. 5. The magnetic field variation on the z axis line from center point of helmholtz coil(z axis)

그리고 각 코일을 동일한 턴수로 권선하더라도 3축 Helmholtz 코일을 구성하는 각 코일(x축, y축, z축)의 직경이 상이하므로 Table 1과 같이 코일의 인덕턴스는 서로 상이하다.

또한 코일상수와 코일간 자기적인 직교도 등 Helmholtz 코일의 자기적인 특성 측정은 한국표준과학연구원에서 교정을 받은 영국 Bartington사의 MAG-01 표준 센서를 사용하였다. 3축 자기장 발생코일의 코일 간 자기적인 직교도는 3축 자기센서의 감도 및 직교성 측정에 매우 중요한 인자로 작용한다. X축 코일에 대한 Y축 코일의 자기적인 직교도는 Fig. 6과 같이 X축 자기장 발생코일에  $B_x$ 에 대항하는 자기장을 인가하고, X축과 수직인 방향 즉 Y축 방향에서의 자기장을 측정하면, 아래 식 (4)로부터 X축에 대한 Y축의 직교도 오차( $\delta$ )를 계산할 수 있다.

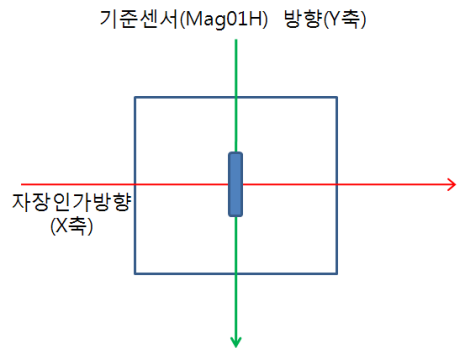


Fig. 6. The method for measuring the orthogonal error between x axis and y axis

$$\delta = \sin^{-1} \frac{B_y}{B_x} \quad (4)$$

식 (3)으로부터 본 연구에서 제작된 3축 Helmholtz 코일의 축간 자기적인 직교도를 측정하면 모두 0.2° 이내임을 알 수 있었다. Fig. 7은 실제 제작된 3축 Helmholtz 코일의 사진이다.

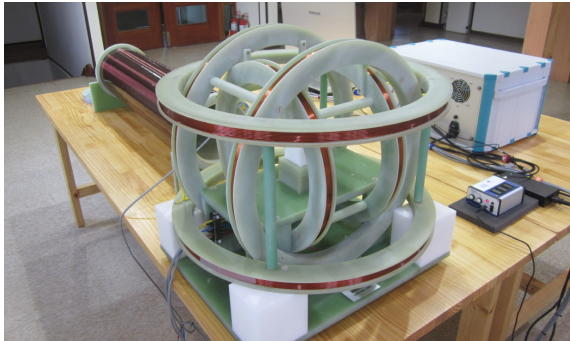


Fig. 7. The photograph of a 3 axis helmholtz coil on the measurement system for measuring the properties of AC magnetic field sensor

신호발생기는 교류자기센서 특성측정 및 분석장치로부터 시험 자기장의 크기 및 주파수 정보를 입력받아 해당되는 신호를 발생시키고, 이러한 신호를 신호 증폭기에 전달하는 역할을 수행한다. 교류자기센서 시험장치에 사용된 신호발생기(Agilent사, 33522A)는 최소 출력 전압이 2 mVpp이고, 최대 출력 전압은 20 Vpp이다. 그리고 출력 전압 분해능 16 bits를 고려하면 수십  $\mu$ A 수준의 매우 미세한 전류를 3축 Helmholtz 코일에 인가할 수 있다.

신호증폭기는 신호발생기로부터의 미약한 신호를 증폭시켜 Helmholtz 코일에 충분한 크기의 시험 자기장 발생이 가능하도록 한다. 신호증폭기의 제작에는 최근 많이 사용되고 있는 APEX사의 Power OP-Amp(PA01)를 사용하였으며, 입력신호에 대한 출력신호의 이득은 3배가 되도록 설계·제작하였다. 특히, Shunt 저항을 Fig. 1과 같이 신호증폭기 출력단에 직렬로 연결하여 신호증폭기로부터 Helmholtz 코일에 인가되는 전류를 모니터링할 수 있도록 하였다. 따라서 Helmholtz 코일 내에 인가되는 자기장은 Shunt 저항 양단전압과 이미 측정된 3축 Helmholtz 코일의 코일 상수로부터 계산되며, 계산된 자기장이 사전 설정된 자기장의 허용오차

를 벗어난다면 코일 인가전류는 재 산정된다.

교류자기센서 신호획득장치는 피 측정대상 센서로부터 측정된 아날로그 형태의 신호와 코일 인가 전류에 의한 Shunt 저항 양단의 전압을 디지털 신호로 변환한 후 시리얼 통신(USB)을 통해서 교류자기센서 특성측정 및 분석장치로 전송하는 역할을 수행한다. 적용된 신호획득장치는 National Instruments사의 USB 6251을 적용하였다. USB 6251은 최대 샘플링 주파수가 1 채널만 사용할 경우, 최대 1.25 MHz이고, 만일 N 채널을 사용할 경우, 최대 샘플링 주파수는 1.0 MHz/N 이다. 교류자기센서 시험장치에서는 인가되는 코일 내부 자기장의 크기와 피 시험대상 센서로부터의 출력 신호 등 2채널의 신호를 동시에 측정해야 하므로 채널당 허용 가능한 최대 샘플링 주파수는 500 kHz이다.

교류자기센서 특성측정 및 분석장치는 3축 Helmholtz 코일에 사용자가 요구하는 자기장을 생성시키기 위한 신호 인가 명령을 신호발생기에 전송하고, 교류자기센서 신호획득장치로부터 전달받은 측정결과로부터 피 측정센서의 특성을 실시간으로 분석하는 운용 프로그램이 탑재된 전산기이다.

본 연구를 통해 설계·제작된 Helmholtz 코일, 신호발생기, 신호증폭기 및 신호획득 장치의 제원을 바탕으로 Helmholtz 코일 내부에서 발생 가능한 자기장을 이론적으로 계산하면 Table 2와 같다. Table 2에서는 3축 Helmholtz 코일의 저항과 인덕턴스를 고려하여 코일의 임피던스를 주파수별로 계산하였고, 그 결과를 보면 1 kHz 이상의 주파수에서는 코일의 리액턴스 성분( $\omega L$ )이 코일 저항 대비 매우 큰 값을 가지므로 주파수가 증가함에 따라 코일의 임피던스가 급격하게 증가함을 알 수 있다.

신호발생기의 최대 출력 전압(10 Vpk)과 신호증폭기의 증폭이득(3배)을 고려하면 자기장 발생코일에 인가 가능한 최대 전압은 30 Vpk이다. 각 주파수별 코일인가 전압으로부터 Shunt 저항(99.96  $\Omega$ )을 포함한 코일 임피던스를 나누게 되면 Table 2와 같이 해당 주파수에서 코일에 인가할 수 있는 최대 전류가 계산된다. 그리고 각 축별 코일 상수를 고려하여 헬름홀츠 코일 내부에서 발생 가능한 최대 자기장을 이론적으로 계산할 수 있다. 하지만 신호획득장치에서 측정 가능한 전압 범위는  $\pm 10$  V이므로 Shunt 저항 양단의 전압이  $\pm 10$  V를 초과하게 되면 신호획득장치는 Shunt 양단 전압을 정확하게 측정할 수 없으며, 코일에 인가되는 전류의 크기도 모니터링할 수가 없다. 예를들어 Table 2의

Table 2. The maximum magnetic field which can be produced in the helmholtz coil according to the operating frequency

코일축	주파수 [Hz]	코일 임피던스 [ $\Omega$ ]	최대 인가가능전류 [mA]	최대 인가자기장 [nT]	shunt 양단전압 [V]	실제생성가능 자기장 [nT]
X	10	2.2	295	98,905	29	33,586
	100	11.8	293	98,276	29	33,586
	1,000	116.1	194	65,237	19	33,586
	3,000	348.2	83	27,766	8	27,766
	10,000	1160.5	26	8,646	3	8,646
Y	10	1.8	295	124,575	30	42,178
	100	9.0	294	124,108	29	42,178
	1,000	88.5	223	93,896	22	42,178
	3,000	265.6	106	44,484	11	42,178
	10,000	885.3	34	14,194	3	14,194
Z	10	2.7	294	82,541	29	28,128
	100	14.8	291	81,713	29	28,128
	1,000	146.6	168	47,206	17	28,128
	3,000	439.8	66	18,683	7	18,683
	10,000	1465.9	20	5,740	2	5,740

X축을 보면 운용주파수 10 Hz에서 코일에 인가할 수 있는 최대 전류는 295 mA이고 이를 고려하면 X축 Helmholtz 코일의 경우는 코일 내부에서 98,905 nT까지의 자기장 발생이 가능하다. 하지만 이 경우, Shunt 저항의 양단전압은 29.4 V가 되어 신호획득장치에서 인식할 수 있는 입력 전압 범위  $\pm 10$  V를 훨씬 초과하게 되어 코일 인가 전류를 측정할 수가 없다. 따라서 신호획득장치의 입력 전압범위  $\pm 10$  V를 고려하면 X축의 경우, 10 Hz에서 최대 33,586 nT까지의 자기장 발생이 가능하다. 따라서 신호획득장치의 입력 전압범위  $\pm 10$  V를 고려하면 X축의 경우, 10 Hz에서 최대 33,586 nT까지의 자기장 발생이 가능하다. 그리고 100 Hz 이하의 저주파수에서는 코일의 임피던스가 작으므로 신호증폭기로부터 코일에 전류 인가 시 리플 성분의 노이즈가 발생하였다. 따라서 저주파수에서 부하 임피던스를 증대시켜 인가전류의 리플성분 노이즈를 저감하기 위한

목적으로 비교적 높은 크기를 가지는 shunt 저항(99.96  $\Omega$ )을 본 시험장치에서는 사용하였다. Fig. 8은 실제로 제작된 교류 자기센서 시험장치의 사진을 보여준다.

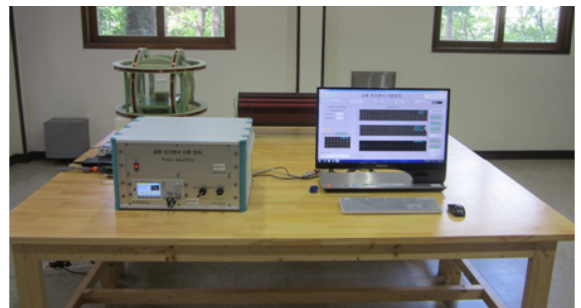


Fig. 8. The photography of the manufactured system for measuring properties of AC magnetic field sensors

### 3. 설계/제작된 시험장치를 이용한 교류자기센서 특성 시험

본 연구를 통해 개발된 교류자기센서 시험장치는 피 측정 대상 센서의 감도, 선형도, 주파수 대역폭 등의 특성 시험이 가능하다.

첫째, 감도 특성 시험은 3축 Helmholtz 코일 내부에 생성되는 시험 자기장 크기에 대한 시험대상 센서의 출력 신호 크기 비로 측정할 수 있다. 감도 특성 시험과 관련된 시험 흐름도를 살펴보면 Fig. 9와 같다. 먼저 시험 자기장을 인가할 Helmholtz 코일의 축을 선택한다. 그리고 시험 자기장의 주파수와 진폭 정보를 교류자기센서 특성 측정 및 분석 장치에 입력한다. 그러면 신호 발생기와 신호증폭기로부터 시험 자기장 발생을 위한 전류가 Helmholtz 코일로 인가되고, Shunt 저항은 코일 인가 전류의 크기를 측정한다. Shunt 저항으로부터 측정된 코일 인가 전류와 코일 상수로부터 코일 내부에 인가되고 있는 자기장의 크기를 계산한 후 그 크기가 사전에 입력된 시험 자기장과 비교할 때 0.5 % 이상의 오차를 가지면 신호발생기로부터의 출력신호 크기를 조정한다. 코일 내부에 인가되고 있는 자기장과 시험 자기장과의 오차가 0.5 % 이내이면, 시험 대상 센서의 출력 신호를 신호획득장치에서 디지털 신호로 변환한 후 교류자기센서 특성 시험 및 분석 장치에서 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행한다. FFT 수행 결과로부터 시험 대상 주파수에서의 센서 출력 신호 크기를 확인하고, 센서 출력 신호로부터 Helmholtz 코일에 인가되는 시험 자기장 크기를 나누어 줌으로써 시험 대상 센서의 감도를 계산할 수 있다. 이처럼 본 연구에서 개발된 교류자기센서 시험장치의 센서 신호 출력 특성 분석은 모두 주파수 영역에서 이루어진다. 그 이유는 외부 환경 잡음이 존재하더라도 피 시험대상 센서에 대한 특성 시험이 정확하게 이루어지도록 하기 위함이다. 외부 환경 자기장 차폐 시설이 없는 공간에서는 60 Hz 대역의 잡음과 같은 외부 환경 잡음이 존재하고, 이는 센서의 측정 정확도를 저하시키는 요인이 된다. 예를 들어 주파수가 100 Hz이고 진폭이 1,000 nTpk인 시험 자기장을 시험대상 센서에 인가하고, 시험대상 센서로부터의 출력 특성을 확인하고자 할 경우를 가정한다. 시험대상 센서에 100 Hz에 해당하는 시험 자기장 신호만을 인가하였다 하더라도 시험대상 센서가 위치하는 공간에 60 Hz의 환경잡음이 존재한다면 시험대상 센서는 100

Hz 신호와 60 Hz에 해당하는 신호를 동시에 수신하므로 시간영역에서는 100 Hz 신호에 대한 센서 출력 특성만을 식별하는 것이 매우 어렵다. 하지만 FFT를 통해서 주파수 영역에서 시험대상 센서의 출력특성을 분석한다면 60 Hz와 100 Hz에서의 센서 출력 특성의 구분이 가능하므로 시험 대상 주파수 100 Hz에 대한 센서 출력 특성만을 측정할 수 있다.

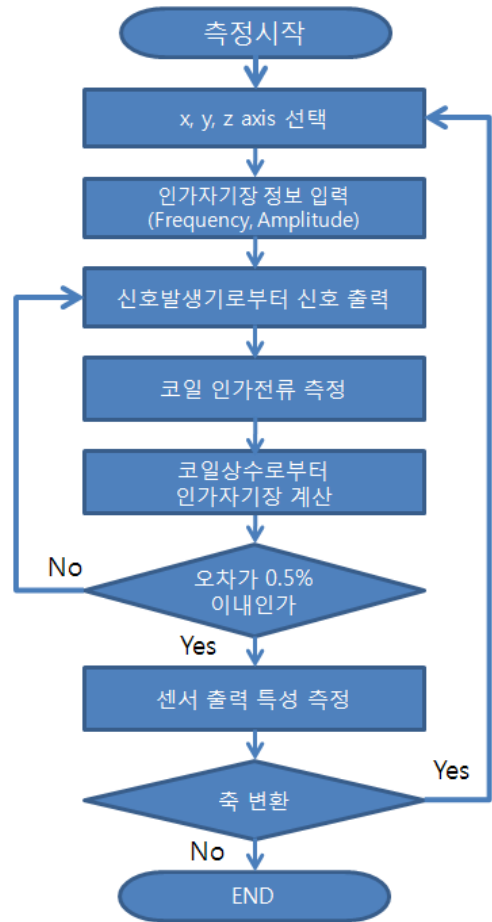


Fig. 9. Flow chart for measuring sensitivity of AC magnetic field sensor

둘째, 센서의 선형도 특성 시험은 시험 자기장에 대한 센서 출력의 선형성을 확인하기 위한 시험이다. 선형도 측정은 Fig. 10과 같이 교류자기센서 특성 측정 및 분석장치의 운용 화면에서 시험 자기장의 주파수와 인가 자기장의 최대/최소 크기 및 간격 등의 설정 값을 입력함으로써 가능하다. 이러한 설정 값이 입력

되면 시험대상 주파수에서 시험자기장의 진폭을 일정한 간격으로 달리하면서 센서의 출력 신호 크기를 측정한다. 그리고 선형도는 측정된 결과로부터 아래 수식 (4)에 의해서 자동으로 계산된다.

$$\text{선형도}(\%) = 100 \times \frac{1}{B_{\max}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^n (x_n - y_n)^2} \quad (4)$$

여기서,  $B_{\max}$ 는 측정된 센서 출력의 최대치,  $N$ 은 측정 데이터 개수,  $x_n$ 은  $n$ 번째 센서 출력 측정 데이터,  $y_n$ 은 측정 결과로부터 Least Square Fit 한 후의  $n$ 번째 측정 데이터이다. Fig. 10은 본 연구를 통해서 개발된 교류 자기센서 특성 시험장치 운용 프로그램의 센서 감도 및 선형도 시험을 위한 VI(Virtual Instrument) 화면을 보여주고 있다.

셋째, 주파수 응답 특성 시험은 인가 자기장의 주파수에 따른 센서의 출력 특성을 확인하기 위한 시험이다. 1 Hz에서 10 kHz의 시험 주파수 범위에서 일정한 진폭을 가지는 시험자기장을 인가한 상태에서 주파수에 따른 센서의 출력 특성을 측정한다. 여기서 시험 자기장은 Fig. 1의 shunt 저항을 통해서 코일 인가 전류를 모니터링하고, 신호발생기 출력 전압을 자동으로

조정함으로써 1~10 kHz까지의 주파수 대역에서 일정하게 유지된다. Fig. 11은 본 연구를 통해서 개발된 교류 자기센서 특성 시험장치 운용 프로그램의 주파수 응답 특성 시험을 위한 VI 화면을 보여주고 있다.

끝으로 본 연구를 통해서 개발된 교류 자기센서 특성 시험 장치를 이용하여 영국 Bartington사의 표준센서 MAG639의 특성을 시험하였다. Fig. 10의 센서 감도 및 선형도 측정 화면은 영국 Bartington사의 MAG639 센서를 대상으로 Z축에 대한 센서 감도 및 선형도 특성을 시험한 결과를 보여준다. 1 kHz와 20,000 nT의 시험 자기장을 Z축 Helmholtz 코일에 인가한 후 센서의 출력 특성을 시험하였고, 그 결과 그림에서 알 수 있듯이 시험대상 센서의 감도는 100.1 mV/μT(0.0001001 V/nT)이고, 센서의 선형도는 0.01163 % (0.0001163)로서 센서 제작사에서 제시한 감도 100 mV/100 μT와 거의 일치함을 확인하였다<sup>7)</sup>.

또한, Fig.11의 주파수 응답 특성 측정 화면은 1Hz에서부터 10 kHz의 주파수 범위에서 시험 자기장 5,000 nTpk 에 대한 주파수 응답 특성을 시험한 결과를 보여준다. 시험결과 센서의 이득이 -3 dB 감소하는 차단 주파수는 대략 9,372 Hz임을 확인하였다.

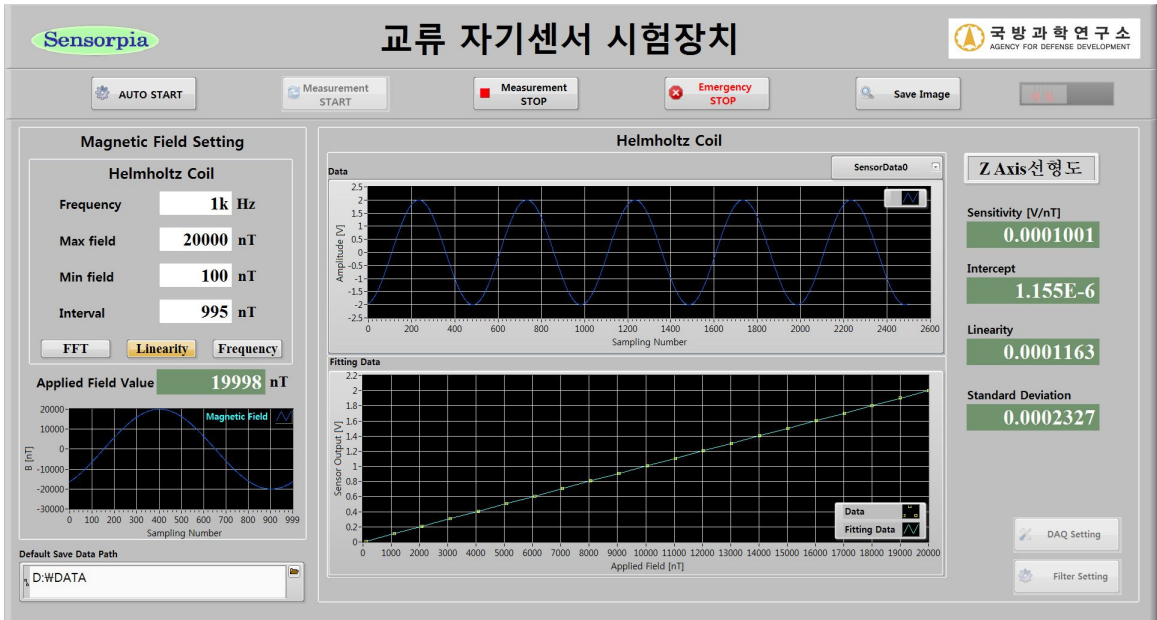


Fig. 10. Virtual instrument view for measuring sensitivity or linearity of AC magnetic field sensor. The sensitivity and linearity property of MAG639 sensor was measured at the frequency of 1 kHz



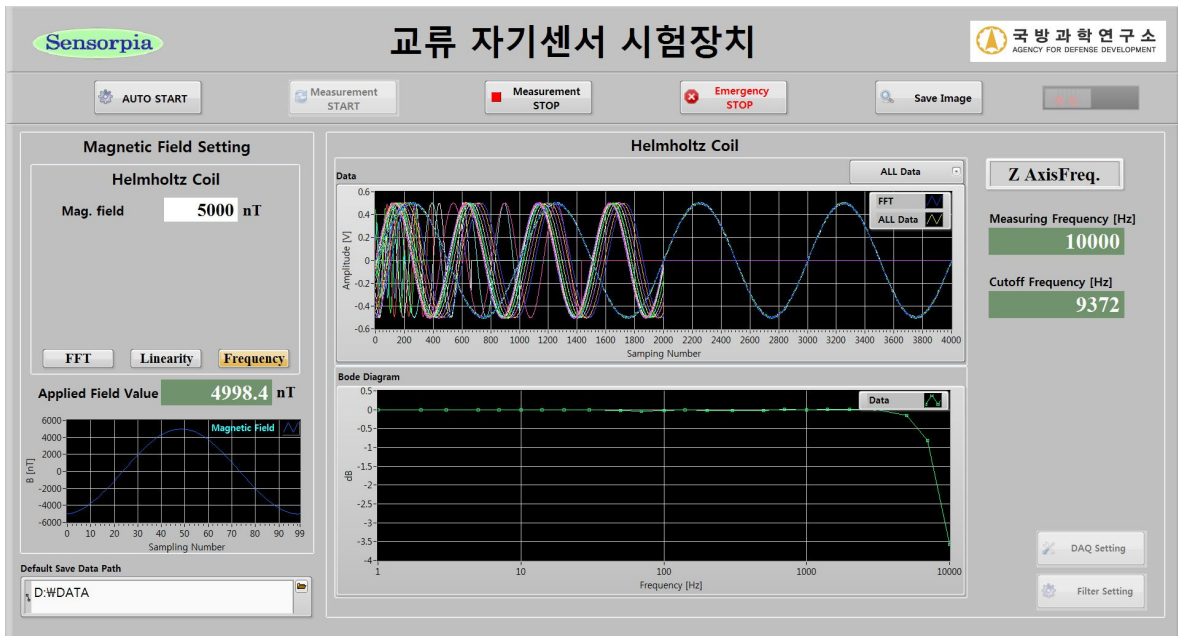


Fig. 11. Virtual instrument view for measuring frequency response of AC magnetic field sensor. The frequency response property of the MAG639 sensor was measured at the field value of 5,000 nT

#### 4. 결론

본 논문에서는 무기체계에 적용되는 각종 교류 자기 센서의 특성 시험을 목적으로 개발된 교류 자기 센서 특성 시험장치의 설계·제작 결과들에 대해 기술하였다. 제작된 교류 자기 센서 시험장치를 이용하면 1 Hz ~ 10 kHz의 주파수 대역에서 3축 교류 자기 센서에 대한 센서 감도, 선형도 및 주파수 응답특성 등의 성능 시험이 가능하다. 또한 개발된 교류 자기 센서 시험장치를 이용하여 영국 Bartington사의 MAG639 센서의 특성 시험을 수행하였으며, 시험 결과는 센서 제작사에서 제시한 사양과 일치하였다.

#### References

[1] John J, Holmes, "Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures(1st Edition)," Morgan & Claypool,

2008.

[2] H. Jones, "Development of a Low a Noise Electric Field Sensor for Measurement and Ranging Applications," MARELEC 2004, 17-18th March 2004.

[3] P. M. Holtham, I. G. Jeffrey, "ELF Signature Control," UDT 96, July, pp. 486-489, 1996.

[4] 양창섭 외, "함정 발생 수중 전자기장 신호의 특성 및 측정 기법," 한국군사과학기술학회지, 제9권 제2호, pp. 11-19, 2006.

[5] 정현주 외, "능동형 자기 센서의 송신출력 향상을 위한 송신기 설계에 관한 연구," 한국자기학회지, 제23권 제5호, pp. 159-165, 2013.

[6] Fausto Fiorillo, "Measurement and Characterization of Magnetic Materials," ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004.

[7] Bartington Instruments, UK, "Brochure for Mag 639 Three-Axis Magnetic Field Sensor," 2014.