

고투자율 등방성 자기 물질을 이용한 공진형 마그네토미터 개발

임정빈*, 심영호**, 안영섭*

*목포해양대학교 해상운송시스템학부, **목포해양대학교 대학원 박사과정

Development of Resonant-Type Magnetometer Using High Permeability Isotropic Magnetic Material

Jeong-Bin Yim*, Yeong-Ho Sim**, Yeong-Sub Ahn*

* Division of Maritime Transportation System, Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

**Doctoral Course, Dept. of Maritime Transportation System, Graduate School of Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

요약 : 본 논문에서는 고투자율 등방성 자기물질을 이용한 공진형 마그네토미터(Resonant-type Magnetometer, RM)의 설계와 개발에 관하여 기술하였다. 먼저, 자기 물질에 감은 코일의 인덕턴스 L 과 등방성 고투자율 자기 물질에서 나타나는 투자율 $\mu(H)$ 사이의 기본이론을 정립하였다. 다음으로, L 의 변화를 간단한 슈미트 트리거 회로를 이용하여 주파수로 획득할 수 있는 RM 회로를 구현하였다. RM의 측정능력을 평가하기 위한 선회실험을 통하여 RM의 지구자장 성분 측정 가능성을 확인하였다.

핵심용어 : 고투자율, 등방성, 자기물질, 공진형 마그네토미터, 지구자장

ABSTRACT : The design and development of Resonant-type Magnetometer(RM) using isotropic magnetic material with high permeability is described in this paper. At first, the relationship between the inductance L of the coil winding on a magnetic material and the permeability $\mu(H)$ appearing in the magnetic material with isotropic and high permeability is defined as a background theory. Then the circuit of RM, which is to obtain the values of L as the change of frequency is implemented using simple Schmitt Trigger circuit. Through the swinging tests, which is to evaluate the measurement ability of RM, the measurement possibility for the component of earth field was confirmed.

KEY WORDS : High Permeability, Isotropic, Magnetic Material, Magnetometer, Earth's Magnetic Field

1. 서론

최근 선박용 마그네틱 콤파스(Magnetic Compass)를 전자 콤파스로 대체하기 위한 연구가 진행되고 있다(IMO-MSB 80(70)). 이러한 전자 콤파스를 구현하기 위한 방법으로는, 반도체 센서를 이용하는 방법, 플럭스 게이트(Flux-gate) 센서를 이용하는 방법, 인덕티브 센서(inductive sensor)를 이용하는 방법 등이 보고되고 있다(임 등, 2005). 그러나 이러한 센서를 이용한 전자 콤파스는 A/D 컨버터(Analog/Digital Converter)가 필요하기 때문에 고가이고, 회로구성이 복잡하여 경량 및 소형화가 어렵고, 고정밀 센서 구현에 한계점을 갖게 된다. 더욱이 자차(deviation)를 구하기 위해서는 선체영구자기와 선체일시자기를 분리 측정해야하는데, 선체영구자기는 일반적으로 선수방위 변화에 관계없이 고정된 값임으로 측정이 가능하나, 선체일시자기의 경우는 선수방위 변화와 위도변화 등에 따라서 수시로 변하기 때문에 측정이 어렵다. 또한, 선체영구자기의 경우에도 현재의 기술로서는 선박을 회전시켜야만 획득할 수 있다(임, 2002a; 임 등, 2002b; 임과 심, 2005).

이러한 이유로 인하여 전자 콤파스가 기존 자기 콤파스(Magnetic Compass)를 대체하지 못하고 있는 실정인데, Furuno(2004), Simrad(2004), Kelvinhugh(2004) 등 전세계 유명 항해장비 제작사의 경우에도 아직까지 자차 문제에 대해서는 해결책을 제시하지 못하고 있다. 이러한 자차문제의 해결에는 더 많은 연구와 노력이 요구된다.

본 연구에서는 마그네토미터(Magnetometer)를 이용하여 자동으로 선체영구자기와 선체일시자기를 분리측정함으로써 자차를 보정할 수 있는 스마트 디지털 콤파스(Smart Digital

* 대표저자 : 종신회원, jbyim@mmu.ac.kr, 061)240-7051

** 정회원, chalesim@hanmail.net, 061) 240-7051

* 종신회원, ysahn@mmu.ac.kr, 061)240-7310

Compass; SDC)의 개발을 최종 목표로 두고, SDC 개발에 우선 필요한 마그네토미터의 설계와 구현에 대해서 연구하였다.

SDC에 필요한 마그네토미터는 x-y-z 3차원의 자장 측정 기능이 필요하고, 20-30개 정도를 다발로 묶어서 사용해야함으로 소형화, 저가격화 등에 커다란 장애요인이 되고 있다(임과 심, 2005).

본 연구에서는 기존 프릭스-게이트 센서를 이용하는 방법과 다른 개념의 센서로서, 고투자율 등방성 자기물질을 이용한 공진형 마그네토미터(Resonant-Type Magnetometer, RM)를 개발하고자 한다. 이러한 RM은 A/D 컨버터를 필요로 하지 않기 때문에 저가, 소형으로 제작할 수 있다.

공진회로를 이용한 RM의 연구는 Salvi *etc*(1968)가 선박에서의 미약한 자기장의 세기를 주파수의 변화로써 검출할 수 있음을 최초로 밝힌 것을 계기로 시작된다. 이 당시 Salvi 등에 의한 방법은 선박과는 별도로 센서를 장착한 것으로 실용화는 불가능하였다. 그 후 Long *etc*(1981)은 지구자장이 금속에 의하여 변동할 때 주파수가 변하는 현상을 측정할 바 있으나, 센서 코일에 대해서 외부자장이 어떠한 방향으로 입력되는 지를 측정하지 못했으며, Sparks *etc*(1982)은 영구자기에 의하여 야기되는 지자기외란을 측정하기 위하여 주파수차를 이용한 마그네토미터를 사용한 바 있으나, 차주파수간의 차이의 크기에 대한 정보만을 이용한 바 있다. 그 후, Takeuchi *etc*(1984)는 간단한 OP 앰프를 이용한 공진형 아모퍼스 리본(Amorphous Ribbon)을 이용하여 마그네토미터를 실용화한 바 있다. 그 후, 미국 PNI사(2005)를 비롯한 많은 회사에서 이 연구결과를 이용하여 제품을 생산하고 있다. 그러나 회로를 제작하기 위한 이론이 정립되어 있지 않고, 영구자기와 일시자기를 분리 측정할 수 있는 방법을 제시하지 못하고 있으며, 설계회로가 미공개된 상태에 있다. 본 연구는 SDC 개발을 위한 기초단계로서 저가, 소형, 고성능 RM을 설계 및 개발하고, 그 성능을 평가하는데 목적이 있다.

2. 이론 정립

2.1 자기 인덕턴스 이론

자기 솔레노이드 코어(magnetic solenoid core)의 자화력 H 는 다음 식(1)로 나타낼 수 있고(C. Lu, 2000),

$$H = \mu_0 n I \quad (1)$$

여기서, μ_0 : 자유공간에서의 투자율(permeability), n : 권선밀도(단위 길이당 코일의 권선수), I : 코일에 공급하는 전류,

솔레노이드 코일 양단에 유기되는 전압 E 는 다음 식(2)로 주어지며,

$$E = n S \left(\frac{dB}{dt} \right) \quad (2)$$

여기서, S : 코어재질의 면적, dB/dt : 전 자속(total magnetic flux)의 시간미분,

H 의 미소변화 또는 미소전이에 대한 유도기전력은 코일을 이상적인 인덕터(inductor) L 로 간주하면, 다음 식(3)과 같이 계산된다.

$$E = L \left(\frac{dI}{dt} \right) \quad (3)$$

위의 식(1)부터 식(3)을 이용하여 다음 식(4)를 구할 수 있다.

$$L = \mu_0 n^2 S \left(\frac{dB}{dH} \right) \quad (4)$$

여기서, dB/dH 는 $B-H$ 커브의 기울기를 나타내며, 이러한 $B-H$ 커브의 기울기는 $\mu-H$ 커브로 나타나는데, 본 연구에서는 $\mu(H) = dB/dH$ 로 표기한다.

위의 식(4)에 기술한 바와 같이 코어의 인덕턴스 L 은 코어의 투자율 $\mu(H)$ 에 비례함을 알 수 있고, 이들 관계를 이용하면 외부에서 가해진 자장의 크기를 L 의 변화로써 측정할 수 있다.

2.2 인덕티브 센서 구현 방법

Fig. 1은 이상적인 고투자율 등방성 자기합금(magnetic alloy)에 대한 $\mu(H)$ 커브를 예로 나타낸 것이다.

Fig. 1에 나타낸 자기합금은 약한 외부자장에 대해서는 고투자율을 나타내고, 강한 외부자장에 대해서는 상대적으로 낮은 투자율을 나타내며, 외부자장의 강약에 따라서 $\mu(H)$ 커브의 선형부분을 따라서 이동하는 경우를 나타낸다. 이러한 자기합금에 솔레노이드 코일을 감고, 코일에 일정한 바이어스 전류를 가하여 코어의 동작점(operating point)을 정하면, 외부자장의 증감에 따라서 위의 식(4)에 나타낸 바와 같이 코일의 인덕턴스 L 이 외부자장에 비례하여 증가하거나 감소하게 된다. 따라서, L 의 변화를 구하면 외부에서 가한 자장의 세기를 구할 수 있다.

이러한 원리를 이용하면 코어의 포화(saturation)와 불포화(un-saturation)를 이용하는 기존 프릭스-게이트 센서(임, 2002a; 임 등, 2002b)와 같이 자성물질을 깊게 포화시키지 않아도 되기 때문에 전력소모가 상대적으로 매우 작게 된다.

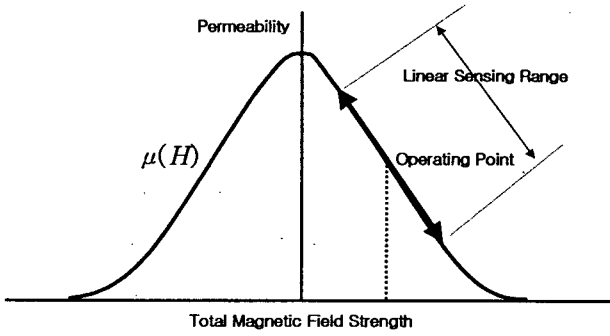


Fig. 1 Ideal curve of $\mu(H)$ for the magnetic alloy with high permeability isotropic characteristics

여기서, Fig. 1에 나타난 바와 같이 RM의 경우는 $\mu(H)$ 커브의 오른쪽 감소곡선부분만을 이용한다. 그 이유는, Fig. 1에 나타난 바와 같이 외부자장이 증가하면 $\mu(H)$ 는 감소하고, 이로 인하여 식(4)의 L 은 감소된다. 여기서, L 의 감소는 일반적인 공진회로에서 주파수를 증가시킨다. 따라서, $\mu(H)$ 커브의 감소곡선부분만을 이용하게 되면 외부자장 증가에 비례한 주파수 증가를 선형적으로 구할 수 있다.

이러한 개념적인 내용을 전기회로에 적용하면 다음과 같다. Fig. 2와 같이 자성 코어에 솔레노이드(Solenoid) 형태로 코일을 감은 경우를 고려한다. 그리고 코일에 DC 바이어스 전류를 공급하고, 여기에 외부자장 H_E 를 코일에 평행하게 가하는 경우를 가정한다.

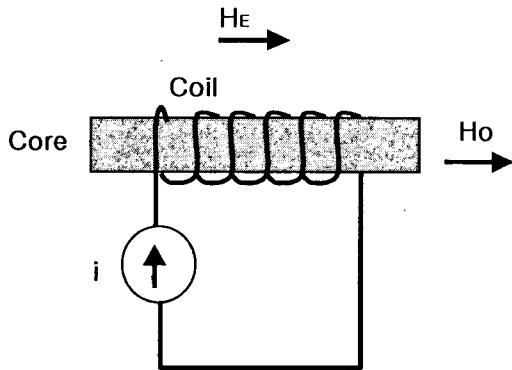


Fig. 2 Magnetic Solenoid with coil applying DC bias and external magnetic field H_E

Fig. 2의 코일에 DC 바이어스 전류를 가하여 자화력 H_0 를 생성하고, 이 H_0 가 Fig. 1의 $\mu(H)$ 커브 중심의 작동점에 있도록 DC 바이어스 전류를 조정한다. 그리고 H_0 와 함께 외부자장 H_E 가 평행하게 가해지면 $H_0 \pm H_E$ 에 의하여 작동점이 $\mu(H)$ 커브의 상하 경사면을 따라서 이동하기 때문에 위의 식(4)에 나타난 코일의 L 이 변화됨으로 외부에서 가해진 H_E 를 구할 수 있다.

3. 회로 설계

3.1 회로구현 방법

일반적으로 자장은 극성을 갖기 때문에 Fig. 3과 같이 극성을 판별하기 위하여 서로 평행하게 놓여서 연결된 2개의 코어(그림에서 1과 2)를 이용한다(HINE, 1968). 각 코어에 코일을 감고, 여기에 여기신호(Exciting Signal)를 3-4 터미널에 가하면 각 코어는 서로 반대 위상의 신호가 가해진다. 5-6 터미널은 임피던스 정합을 위한 등가 임피던스이고, 7-8 터미널은 출력이다.

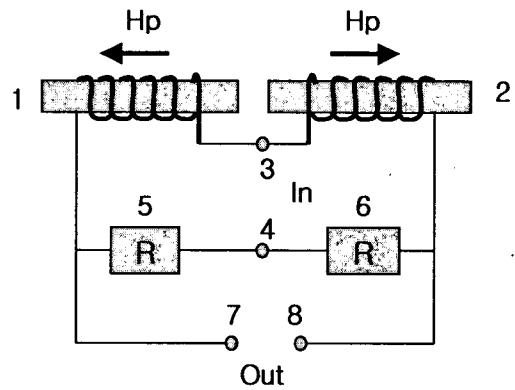


Fig. 3 Basic circuit diagram to extract applied magnetic field H_E

따라서, 2개의 코어에는 세기가 동일하고 서로 다른 극성을 갖는 H_p 가 가해지고, 외부자장 H_E 를 가하면 한쪽의 코어에는 $H_p + H_E$ 가 되고, 다른쪽 코어에는 $H_p - H_E$ 가 가해진다. 따라서, $H_p + H_E$ 와 $H_p - H_E$ 의 차를 구하면 순수하게 외부에서 가해진 H_E 를 7-8 터미널에서 구할 수 있다.

Fig. 3에서, 터미널 3-4에 가해지는 여기신호는 사인파, 구형파, 삼각파 등을 이용할 수 있다. 구형파를 제외한 사인파나 삼각파를 여기신호로 이용하는 경우, 터미널 7-8에서 출력되는 신호는 대단 복잡한 형태로 출력된다. 이러한 사인파나 삼각파를 이용하는 경우의 출력신호의 복잡성은 이미 기존 프리스-게이트 센서 개발연구(HINE, 1968)에 보고된 것으로, 다양한 필터와 A/D 컨버터를 이용해야만 출력신호를 추출 및 해석할 수 있다.

한편, 인덕턴스를 측정하기 위한 회로의 경우, 슈미트 트리거(Schmitt Trigger) 회로를 이용하여 인덕턴스 변화를 구형파 주파수의 듀티비(Duty Cycle)로 측정하는 경우도 있다. 이 경우 간단한 주파수 카운터나 마이크로프로세서를 이용함으로써 A/D 컨버터를 이용하지 않아도 된다(D. Cappel, 2005).

본 연구에서도 A/D 컨버터를 사용하지 않고 회로를 간단히 구축하기 위하여 여기신호로서 구형파를 이용하고 슈미트 트리거 회로를 이용하는 방법을 적용한다.

구형파를 이용하는 경우, Fig. 3의 터미널 7-8에서 출력되는

신호는 외부자장의 H_E 를 고려하여 다음과 같이 전개할 수 있다. 우선, 구형파의 기본 항(fundamental term) H_1 을 다음 식(5)로 고려하면(Hine, 1968),

$$H_1 = \frac{4H_E}{\pi} \cos \omega t \quad (5)$$

발생하는 자속밀도 B_1 는 다음 식(6)과 같고,

$$B_1 = \mu \frac{4H_E}{\pi} \cos \omega t$$

이 때의 터미널 7-8에서 발생하는 전압 E_1 은,

$$E_1 = -8 \mu f H_E \sin \omega t \quad (7)$$

나타난다. 따라서, 가해진 H_E 에 대해서 E_1 이 비례하는 형태로 나타나며, 결과적으로 슈미트 트리거의 트리거 전압을 변동시켜서 출력 주파수의 차가 발생하게 된다.

Fig. 4는 슈미트 트리거를 이용하여 Fig. 3의 회로를 구현하기 위한 회로구성도 이다.

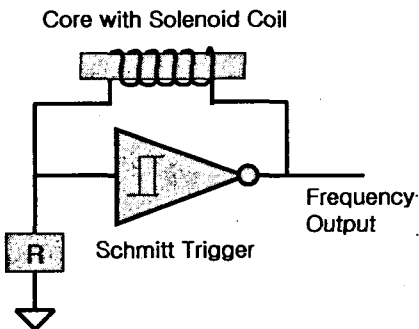


Fig. 4 Resonant circuit using Schmitt Trigger and magnetic Solenoid Coil to implement the circuit in Fig. 3

Fig. 4는 코어에 코일을 감은 센서를 슈미트 트리거 회로 사이에 연결함으로써 공진회로를 구성한 것이다. 이 경우, 출력 T 의 주기는 L/R 에 비례한다. 저항 R 은 코어의 DC 바이어스 전류를 결정하기 때문에 적절히 조절하여 Fig. 1의 $\mu(H)$ 경사면 중앙에 작동점을 두어서 다이내믹 레인지를 최적화한다. 일반적으로 공진회로에 인덕터형 시정수 회로를 사용하는 경우, 출력단에서는 주파수 변화가 출력되는데, 이 때 출력신호의 듀티비는 일반적으로 비대칭으로 나타난다. 그러나, Fig. 1에 나타낸 $\mu(H)$ 경사면의 경우는 작동점을 중심으로 어느 부분까지는 선형이기 때문에 듀티비가 크게 변하지 않는다.

3.2 회로구성의 간략화

위의 Fig. 4의 경우, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 극성을 갖는 H_E 를 측정하기 위해서 서로 수평하게 이어진 2개의 센서가 필요하다. 그러나, 다음 Fig. 5와 같이 반도체 스위치를 이용하여 순방향과 역방향 교호로 DC 바이어스를 가함으로써 하나의 센서를 이용하여 H_E 를 측정하는 회로를 구성할 수 있다.

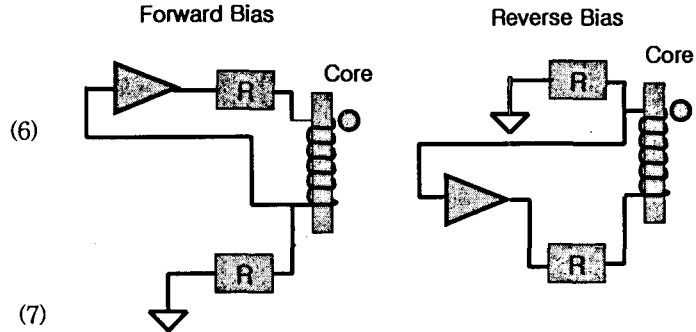


Fig. 5 Forward bias versus reverse bias

Fig. 5와 같이 회로를 구성하면 회로가 간단해지는 것 이외에도 많은 장점이 있다. 두개의 센서를 이용하는 경우에는 Fig. 1에 나타낸 $\mu(H)$ 에서의 동작점에 두개 센서의 DC 바이어스를 모두 조정해야하고, 더욱이 두개의 센서 모두 온도변화에 따른 동작점 변동을 방지하기 위하여 별도의 회로를 부가해야한다. 그러나 Fig. 5와 같이 구성하는 경우에는 하나의 센서에 대한 역방향과 순방향 DC 바이어스 일 때의 차로써 H_E 를 구할 수 있기 때문에 온도변화에 따른 드리프트를 제거할 수 있고, 동작점 이동에 따른 변화를 방지할 수 있다. 그 원리는 다음과 같다.

예를 들어, x-y 좌표로 Fig. 5와 같은 센서를 각각 설치한 경우를 가정한다. 각 센서로부터 측정된 값을 (X_1, Y_1) 과 (X_2, Y_2) 로 나타내면, X_1 은 x-축 좌표에 설치한 센서의 순방향 바이어스(Fig. 5의 좌측)일 때의 값이고, X_2 는 역방향 바이어스(Fig. 5의 우측)일 때 값이며, Y_1 과 Y_2 역시 y-축 좌표에 설치한 센서의 순방향과 역방향 바이어스에 대한 값을 나타낸다.

그리고, x-y 좌표에 대해서 측정할 지구자장을 (X_e, Y_e) 로 두고, 선박 자체에서 발생하는 외란(영구자기와 일시자기의 합성분을 (X_I, Y_I) 로 두면, 이를 모두 고려하여 측정된 값은 다음 식(8)로 나타낼 수 있고,

$$\left. \begin{aligned} X_n &= X_e + X_I \\ Y_n &= Y_e + Y_I \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

순수한 지구자장 (X_e, Y_e) 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} X_e &= X_n - X_I \\ Y_e &= Y_n - Y_I \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

여기서, 센서는 선박에 고정되어 있기 때문에 (X_1, Y_1) 과 (X_2, Y_2) 에는 이미 (X_I, Y_I) 가 포함되어 있고, X_1 과 X_2 및 Y_1 과 Y_2 사이에는 다음 관계가 성립한다.

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= X_e + X_I \\ Y_1 &= Y_e + Y_I \\ X_2 &= -X_e + X_I \\ Y_2 &= -Y_e + Y_I \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

다음 식과 같이 위의 식(10)의 관계를 정리하면 다음 식(11)로 (X_I, Y_I) 를 계산할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} X_I &= \frac{(X_1 + X_2)}{2} \\ Y_I &= \frac{(Y_1 + Y_2)}{2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

한편, 위의 식(11)에서 (X_I, Y_I) 의 성분은 선체영구자기 성분에 대해서 일정한 값을 갖게 되지만, 선체일시자기 성분에 대해서는 선수 방위와 위도 등에 따라서 변하게 된다. 따라서, 선체영구자기 성분에 대해서는 사전에 측정된 값을 메모리에 저장하여 참조 값으로 이용함으로써 제거할 수 있으나, 선체일시자기에 대해서는 별도의 알고리즘을 고려해야 한다.

3.3 자기 코어 재료 선택

위에서 기술한 바와 같이 RM을 구현하기 위해서는 고투자율의 등방성 자기물질이 요구된다. 이러한 물질의 제작에는 고도 기술이 요하기 때문에 본 연구에서는 시판되고 있는 물질 중, HITACHI사 계열의 METGLAS사 제품 중에서 Alloy 2705M을 사용하였다. Alloy 2705M은 시판되고 있는 물질 중에서 가장 큰 투자율을 나타내고, 기술 데이터에 의한 결과 $\mu(H)$ 커브의 선형부분이 상당히 넓어서 다이내믹 레인지를 크게 확보 가능함을 알았다. 부록으로 나나낸 Table 1은 METGLAS사에서 생산하고 있는 자기물질의 비교표이다.

4. 마그네토미터의 구축과 실험 및 결과

4.1 시스템 구성

위에서 설계한 자기 센서 회로와 자기물질 2705M을 이용하여 마그네토미터를 제작하였다. Fig. 6은 제작한 자기 센서 3개를 이용하여 제작한 실험용 마그네토미터의 구성도를 나타낸다.

먼저, x, y, z 축에 각각 자기 센서를 설치한 후, MUX를 이용하여 Fig. 5에서 설계한 순방향과 역방향 바이어스를 순차적으로 가하면서 각각의 센서에서 지구자장을 측정하였다. 이러한 측정에는 마이크로 프로세서를 이용하여 제어하고 데이터를 외부로 인출하였다. 그리고, 측정 데이터는 RS-232C 포트를 이용하여 PC로 전송해서 데이터를 수집하도록 하였다.

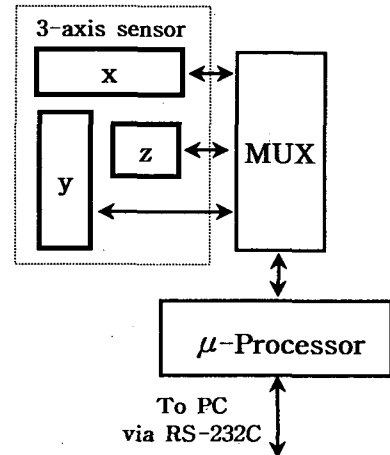


Fig. 6 Overall system configuration of 3-axis Magnetometer

Fig. 7에 제작한 마그네토미터(좌측 그림)와 데이터를 저장하기 위한 컴퓨터(우측 그림)를 나타냈다. 마그네토미터의 제어와 데이터 입출력에 사용한 마이크로프로세서는 PICBASIC200이라는 소형칩을 사용하였다. 컴퓨터에는 수집한 데이터를 호출하고 분석하기 위한 소프트웨어를 Matlab6.1을 이용하여 구축하였다. Fig. 7의 PC 화면에 분석된 결과가 일부 나타나 있다.

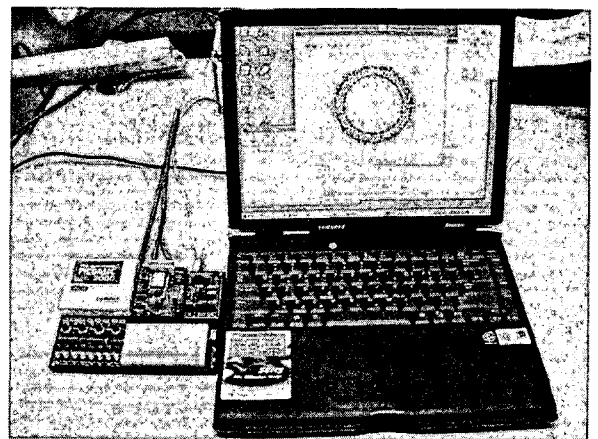


Fig. 7 Test equipments with Magnetometer

4.2 실험방법

실험방법은, Fig. 7의 좌측에 나타낸 마그네토미터를 x-축, y-축 또는 z-축 등을 기준으로 각각 회전시키면서 각 축에서

수신한 지구자장 성분을 분석하여 각 센서의 지구자장 측정 기능을 검토하였다.

실험절차는, 마그네토미터를 Fig. 8과 같이 x, y, z 축에 대해서, 먼저 Z-축을 고정한 상태에서 X-Y 축을 회전시켜서 데이터를 획득하였다(그림의 Test-1으로 표시). 다음에는 X-축을 고정한 상태에서 Z-Y 축을 회전시켜서 데이터를 획득하였다(그림의 Test-2로 표시). 마지막으로 Y-축을 고정시키고 X-Z 축을 회전시켜서 데이터를 획득하였다(그림의 Test-3으로 표시). 이러한 실험절차는 모두 수작업으로 하였다. 정밀분석을 위해서는 스텝 모터를 이용하여 정밀하게 방위를 제어하면서 측정해야하지만, 본 연구에서는 제작한 마그네토미터의 성능만을 분석할 목적으로 간단히 손으로 2-3회 정도 돌려서 실험을 하였다.

이와같이 x, y, z 축 중에서 하나의 축을 고정하고 다른 두개의 축을 하나의 공간평면으로하여 회전시키면서 측정하면, 각 센서 쌍에 의해서 표현되는 평면공간의 지구자장 요소를 쌍으로 측정할 수 있기 때문에 마그네토미터의 성능을 쉽고 효과적으로 평가할 수 있다. 지구자장 이외의 외란이 없는 경우라면, 2개의 쌍으로 이루어진 평면공간은 반지름이 일정한 원으로 나타나게 된다.

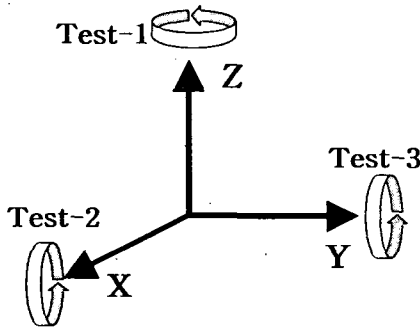


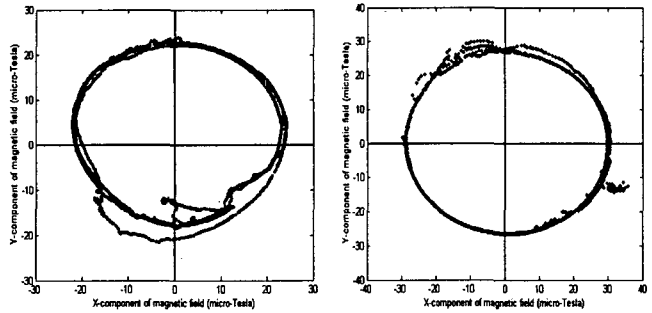
Fig. 8 Definition of swinging scenario to test Magnetometer

4.3 실험결과

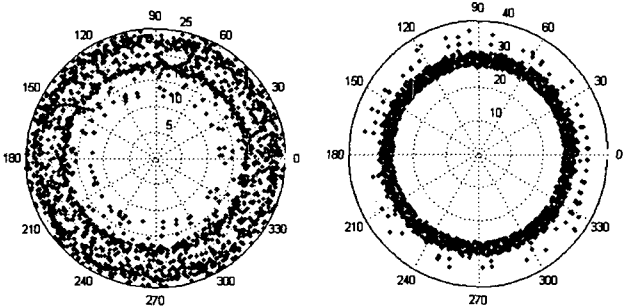
Fig. 9부터 Fig. 11에 실험결과를 나타냈다. Fig. 9는 Test-1 시나리오에 의거하여 Z-축을 고정하고 X-Y 평면으로 회전시킨 경우의 분석결과를 나타내고, Fig. 10은 Test-2 시나리오에 의거하여 X-축을 고정하고 Y-Z 평면으로 회전시킨 경우의 분석결과, Fig. 11은 Test-3 시나리오에 의거하여 Y-축을 고정하고 X-Z 평면으로 회전시킨 경우의 분석결과를 각각 나타낸다.

먼저 Fig. 9을 보면, (a)에 그림 2개, (b)에 그림 2개로 구성되어 있다. Fig. 9(a)는 x-축 및 y-축의 센서에서 마이크로 테슬라(μT)로 측정한 지구자장 X 및 Y에 대해서, X 값을 x-축으로 두고, Y 값을 y-축에 표시한 것으로, Fig. 9의 좌측은 임의의 자기외란을 가한 경우를 나타내고, Fig. 9의 우측은 외란이 없는 경우를 나타낸다. 외란이 가해진 Fig. 9(a)의 좌측 그림의 경우 반지름이 일정한 원이 아님을 알 수 있고, 외란이 없는 Fig. 9(a)의 우측 그림의 경우는 반지름이 일정한 원으로 됨을 알 수 있다. 여기서, 각 그림은 손으로 마그네토미터를 2~3회

돌려서 측정한 것이기 때문에 데이터가 매끄럽게 나타나지 못하고 있다. 그리고, Fig. 9(a)와 같은 표시를 통해서는 외란이 가해진 것과 외란이 없는 것과의 차이를 쉽게 알 수 없다. 그래서, 본 연구에서는 Fig. 9(a)에서 측정한 X 및 Y 값을 이용하여 방위 θ_{XY} 를 구하고, 원점으로부터 거리 $\rho_{XY}(=\sqrt{X^2 + Y^2})$ 를 계산하여 Fig. 9(b)와 같이 극좌표에 다시 나타내어 분석을 시도하였다.



(a) X- versus Y-component plot of magnetic field (μT)



(b) Contour plot on θ_{XY} versus ρ_{XY}

Fig. 9 Swinging results for the Z-axis (the left side : with disturbance, the right side : without disturbance)

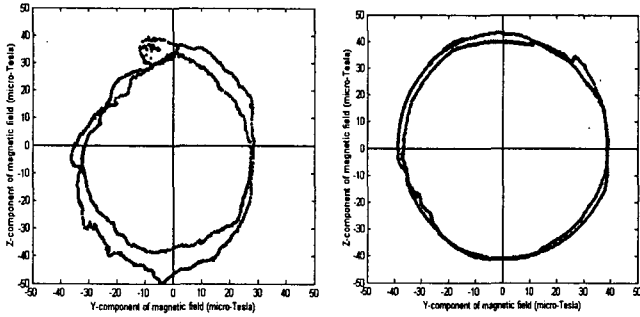
Fig. 9(b)의 좌측 그림은 Fig. 9(a) 좌측 그림에 대한 극좌표 분석이고, Fig. 9(b)의 우측 그림은 Fig. 9(a) 우측 그림에 대한 극좌표 분석 결과이다. Fig. 9(b)에 나타난 바와 같이 외란이 가해진 경우(좌측 그림)에는 θ_{XY} 에 대한 ρ_{XY} 값의 분산이 심하게 나타나고 있는데, 외란이 없는 경우(우측 그림)에는 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다.

Fig. 10의 경우 역시 Fig. 9와 같은 방법으로 그림 4개를 나타낸 것이다.

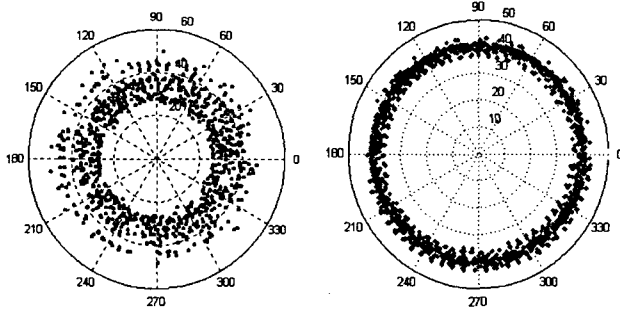
먼저, Fig. 10(a)의 결과를 보면, y-축 및 z-축 센서에서 측정된 Y 및 Z 값의 Y-Z 표시의 경우, 외란이 가해진 결과(좌측 그림)는 상하로 편이되어 있음을 알 수 있고, 외란이 없는 경우(우측 그림)에는 일정한 원을 유지함을 알 수 있다.

또한, Fig. 10(b)의 극좌표 표시 결과에서 외란이 있는 것과 없는 것 사이의 차이를 명확히 알 수 있다.

마지막으로, Fig. 9의 분석방법과 동일한 방법으로 분석한 Fig. 11의 경우에도 외란이 있는 것(좌측 그림들)과 외란이 없는 것(우측 그림들) 사이의 차이가 현저함을 알 수 있다.

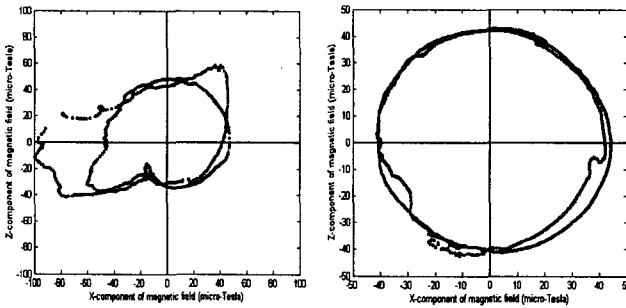


(a) Y- versus Z-component plot of magnetic field (μT)

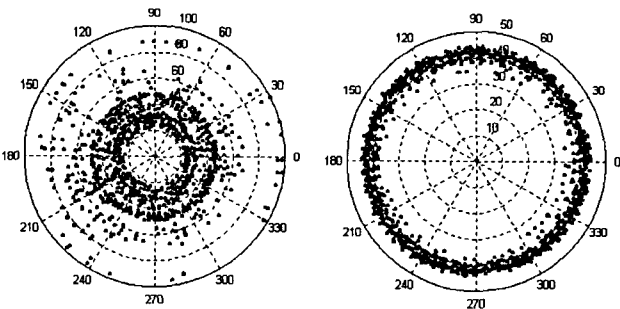


(b) Contour plot on θ_{YZ} versus ρ_{YZ}

Fig. 10 Swinging results for the X-axis (the left side : with disturbance, the right side : without disturbance)



(a) X- versus Z-component plot of magnetic field (μT)



(b) Contour plot on θ_{XZ} versus ρ_{XZ}

Fig. 11 Swinging results for the Y-axis (the left side : with disturbance, the right side : without disturbance)

4.4 검토

선회실험 결과, 3개의 센서에서 출력된 지구자장의 3가지 성분인 X, Y, Z 값들이 외란이 있는 경우와 외란이 없는 경우 상이한 값을 출력하여 제작한 마그네토미터가 정상 작동함을 알 수 있다. 특히, 외란이 없는 상태에서는 2축 평면에 나타나는 원의 반지름이 일정한 형태로 나타나고, 극좌표 표시의 경우에는 방위에 대해서 일정한 거리에 자장성분이 수렴함을 나타내었는데, 이 의미는 제작한 마그네토미터가 정확하게 지구자장성분을 측정하고 있음을 나타낸다. 종합적으로, 이 실험을 통하여 제작한 마그네토미터가 정상적으로 설계되었고 제작되었음을 알 수 있다.

한편 마그네토미터를 정밀측정하기 위해서는 헬름홀츠코일(Helmholtz Coil)에 마그네토미터를 설치하여, 분해능과 시간에 따른 드리프트의 영향 및 최소와 최대 측정 밴드 등을 측정해야 한다. 이러한 실험은 상당한 시일과 고정밀 고기능의 측정장비가 필요하다. 현재 이러한 정밀측정을 위한 장비를 제작 중에 있고, 향후 이 장비를 이용하여 제작한 마그네토미터를 정밀분석할 예정이다.

5. 결 론

본 연구에서는 고투자율 등방성 자기물질을 이용한 공진형 마그네토미터(Resonant-Type Magnetometer, RM)를 설계하고 개발하였다. 연구결과와 요약은 다음과 같다.

- (1) 고투자율 등방성 코어를 이용한 RM의 원리를 정립하였다.
- (2) 2705M 자기물질과 슈미트트리거 회로를 이용함으로써 A/D 컨버터가 없는 RM을 설계하고 제작할 수 있었다.
- (3) RM 회로 설계에서, 한 쌍의 센서를 이용해야 외부자장의 극성을 분리할 수 있었던 것을 하나의 센서만 이용하더라도 지구자장을 측정할 수 있는 새로운 회로를 제안하였다.
- (4) RM을 이용한 마그네토미터 평가실험결과, X, Y, Z 3개의 축에서 정확하게 지구자장 획득이 가능하였다.

향후 정밀측정장비를 제작하여 개발한 RM을 정밀하게 평가하여 성능을 향상시킬 예정이며, 그 후에 선체연구자기와 선체일시자기를 분리측정할 수 있고 자동으로 보정할 수 있는 스마트 디지털 콤팩스를 개발할 예정이다.

후 기

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-R05-2004-000-10760-0)

참 고 문 헌

- [1] 임정빈 (2002a), 2-채널 링-코어 플럭스 게이트 콤파스의 위상검출회로 설계와 구현에 관한 연구, 한국항해항만학회지, 제26권, 제1호, pp.127-136.
- [2] 임정빈, 정중식, 박성현, 김봉석 (2002b), 2-채널 링-코어 플럭스-게이트 콤파스의 성능평가 시스템 개발, 한국항해항만학회지, 제26권, 제5호, pp. 529-535.
- [3] 임정빈, 심영호(2005), 단일 자기침로에서의 자차계수 B와 C의 새로운 획득 방법, 한국항해항만학회지, 28권, 10호, pp.851-859.
- [4] 임정빈, 심영호, 안영섭(2005), 고투자율 등방성 자기물질을 이용한 공진형 마그네토미터의 설계, 한국항해항만학회 춘계학술발표대회 논문집, 제29권, 제1호, pp.133-139.
- [5] Alfred Hine (1968), *Magnetic Compasses and Magnetometers*, Adam Hilger Ltd., Great Britain, pp.267-303.
- [6] C. Lu(2000), *Lecture note for Stress Analysis of the PEP-4 Solenoid Coil*, Princeton University.
- [7] Dick Cappel(2005), *RF Inductance Meter*, www.projects.cappels.org.
- [8] Furuno (2004), *Fluxgate Compass C-500*, <http://www.furuno.co.jp>.
- [9] IMO-MS.86(70), Annex 17, *Adoptation of New and Amended Performance Standards for Navigational Equipment*, IMO.
- [10] Kelvin Hugh (2004), *C100 Compass Engine*, <http://www.kvh.com>.
- [11] Kongsberg (2004), *Simrad RFC35 Fluxgate Compass*, <http://www.simrad.com>.
- [12] Long(1981), US Patent No. 4,305,034, issued Dec.8, 1981.
- [13] PNI (2004), *TCM2 Electronic Compass Module*, <http://www.pnicorp.com>.
- [14] Salvi(1968), US Patent No. 3,396,329, issued Aug. 6, 1968.
- [15] Sparks(1982), US Patent No. 4,340,861, issued Jul. 20, 1982.
- [16] Takeuchi(1984), A Resonant-Type Amorphous Ribbon Magnetometer Driven by an Operational Amplifier, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, No. 5, pp.1723-1725.

원고접수일 : 2005년 05월 13일

원고채택일 : 2005년 06월 24일

고투자율 동방성 자기 물질을 이용한 공진형 마그네토미터 개발

부 록

Table 1. General Properties & Characteristics of Alloys

		2605CO	2605SA1 (Iron-based)	2605S3A (Iron-based)	2605SC (Iron-based)	2705M (Cobalt-based)	2714A (Cobalt-based)	2826MB (Iron-Nickel-based)
APPLICATIONS		-Magnetic Switches -Pulse Power Devices	-Distribution and power transformers -Motors -High frequency inductors -Current transformers -Devices requiring high permeability	-Current transformers -Ground fault protection devices -High frequency cores	-Pulse power devices -Power transformers -Current transducers -Devices requiring a square-loop high saturation material -Magnetic Switches	-Flexible electromagnetic shielding -Magnetic sensors -High frequency cores -Magnetic Switches	-Switch-mode power supply applications -magnetic amplifiers -semiconductor noise suppression cores -High frequency transformers	-Field sensors -Shielding applications -High frequency cores -Magnetomechanical sensors
BENEFITS		-High saturation induction -Square B-H loop -Low coercivity -Can be annealed for high or low permeability	-Extremely low core loss - less than 0.2 W/kg at 60 Hz, 1.4 Tesla, or 30% of the core loss of grade M-2 electrical steel (core loss at 50 Hz is approximately 80% of 60 Hz values) -High permeability	-Low core loss at high frequencies (>1 kHz) -High operating temperature with minimal flux density reduction -Can be annealed for high permeability in low or high frequencies	-High saturation induction -Extremely low core loss -High BH squareness - Can be annealed for medium to high permeability	-Near-zero magnetostriction -High permeability and square BH loop without annealing -Can be annealed for square or linear permeability -Medium saturation induction	-Extremely low core loss -Ultrahigh permeability -High squareness ratio - low coercive force -Near-zero magnetostriction -Excellent corrosion resistance -Can be annealed for linear BH loop	-Medium saturation induction -Lower magnetostriction -Higher corrosion resistance -Can be annealed for high permeability, rounded or square BH loop
ELECTROMAGNETIC	Saturation Induction (Tesla)	1.80	-	1.41	1.61	0.77	0.57	0.88
	" As Cast	-	1.56	-	-	-	-	-
	Maximum DC Permeability							
	Annealed (High Freq.)	400,000	600,000	35,000	300,000	600,000	1,000,000	800,000
	" As Cast	120,000	45,000	>20,000	>40,000	290,000	>80,000	>50,000
	Saturation Magnetostriction (ppm)	35	27	20	30	<<1	<<1	12
	Electrical Resistivity	123	130	138	135	136	142	138
Curie Temperature (C)	415	385	358	370	365	225	353	
PHYSICAL	Thickness (mils)	0.90	1.0	0.7	0.7	0.85	0.6	1.15
	Standard Available Widths							
	Minimum(inches)	0.10	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Maximum(inches)	2.0	8.4	2.0	2.0	2.0	2.0	0.5
	Density (g/cc)	7.56		7.29	7.32	7.80	7.59	7.90
	" As Cast	-	7.19					
	Vicker's Hardness (50g Load)	810	900	860	880	900	960	740
	Tensile Strength (MPa)	1,000-1,700	1,000-1,700	1,000-1,700	1,000-1,700	1,000-1,700	1,000-1,700	1,000-1,700
	Elastic Modulus (GPa)	100-110	100-110	100-110	100-110	100-110	100-110	100-110
	Lamination Factor (%)	>75	>79	>75	>75	>75	>75	>75
	Thermal Expansion(ppm/°C)	8.6	2-7	6.7	5.9	12.1	12.7	11.7
	Crystallization Temperature (C)	430	510	535	480	520	550	410
	Continuqus Service Temp. (C)	125	150	150	125	90	90	125