

3축 자력계 Modeling & Simulation 및 수중무기체계 적용

임병선¹ · 한승환² · 김영길^{3*}

3-Axis Magnetometer Modeling & Simulation and Implementation for Under Water Weapon System

Byeong-seon Lim¹ · Seung-hwan Han² · Young-kil Kim^{3*}

¹Department of NCW Engineering, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

²LIG Nex1 Co., Ltd., Seongnam, 463-400, Korea

^{3*}Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

요 약

본 연구에서는 다양한 수중무기폭발 체계 중 대표적인 비닉(庇匿) 무기체계인 기뢰를 중심으로 공격형 부설에 의한 억제 시 적함 탐지의 핵심이 될 자력계를 신규 Modeling & Simulation에 의해 성능 개선의 효과를 사전 검증한다. 또한, 신규 3축 자력계를 설계/제작/실험을 진행한 결과를 다룬다. 신규 자력계를 새로운 신형 수중무기체계에 적용하기 위해 상용 전자기장 수치해석 도구를 이용해 잠수함을 모델링하여 실 함정의 자기장특성을 예측한다. 실험의 마지막 단계로 축소 모형을 제작하여 실제 해상시험을 하지 않더라도 육상에서 성능검증 할 수 있는 방법을 제시한다.

ABSTRACT

This research handles the performance improvement effect by the Modeling & Simulation and shows the design, implementation, test results of the new 3-axis magnetometer which is the core component of strategic offensive deploying mine. The submarine is modelled by using the commercial electromagnetic field analysis tool on numerical value, and its magnetic field characteristic is predicted in order to apply the new magnetometer to the future underwater weapon system. The method to take the performance test results of new 3-axis magnetometer in the land is shown instead of the real test result in sea by making the miniature submarine.

키워드 : 3축 자력계, 자기장, 모델링 & 시뮬레이션

Key word : 3-Axis Magnetimeter, Magnetic Field, Modeling & Simulation

접수일자 : 2014. 10. 08 심사완료일자 : 2014. 10. 25 게재확정일자 : 2014. 11. 13

* **Corresponding Author** Young-Kil Kim(ykkim@ajou.ac.kr, Tel:+82-31-219-2364)

Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.12.3069>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

수중 무기체계의 주장약 폭발에 의한 함정 손상 등의 피해 위험성이 2010년 천안함 피폭과 침몰로 인해 전시 뿐 만 아니라 평시에도 대단히 중요하게 다뤄져야하며, 그에 따른 방어대책 나아가 사전 억제 수단이 필수적으로 필요함을 인지하게 되었다[1].

본 연구에서는 다양한 수중무기폭발 체계 중 대표적인 비닉(庇匿) 무기체계인 기뢰를 중심으로 공격형 부설에 의한 억제 시 적함 탐지의 핵심이 될 자력계를 신규 Modeling & Simulation에 의해 성능 개선의 효과를 사전 검증하고 신규 자력계를 설계/제작/실험을 진행한 결과를 다룬다. 또한 신규 자력계를 새로운 신형 수중 무기체계에 적용하기 위해 상용 전자기장 수치해석 도구를 이용하여 전투용 수상함과 잠수함을 모델링하여 실 함정의 자기장특성을 예측하고, 축소 모형을 제작하여 실제 해상시험을 하지 않더라도 육상에서 성능검증할 수 있는 방법을 제시한다. 또한, 신규 자력계가 새로운 수중무기체계에 적용될 때 감응을 위한 최대 성능이 발휘 될 수 있도록 무기체계를 구성하는 강자성 추진체 등이 자력계에 감도 저하를 야기 시킬 문제점 등은 없는지 분석해 본다.

수중환경에서는 대기(大氣)중과는 달리 음향, 압력, 전자기장 등이 주 탐지원이 된다. 함정이 발생하는 특성 신호에는 기계류 등에 의한 음향신호와 자기장 신호가 있다. 이중 계절에 따른 수온변화와 해저 저질 등의 영향에 의해 탐지 성능의 증감폭이 큰 음향센서와 달리 함정의 정자기장 신호는 해양 환경조건의 변화에 무관하고, 근거리 영역에서의 비교적 정확한 표적 탐지 및 식별이 가능하다는 장점이 있기 때문에 수중에서의 물체탐지는 음향, 압력센서와 더불어 강자성(ferromagnetic) 선체에 의해 발생하는 정자기장 신호를 탐지하기 위한 자기센서가 주 탐지수단으로 사용되었다.

강철로 건조된 해군 함정들은 지구자기장에 의해 정수직하방(Positive Down, z축), 정이물방향(Positive toward the bow, x축), 정우현방향(Positive toward the starboard side, y축) 영향을 받는 3축 직교(orthogonal) 유도자기장(Induced Magnetic Field)과, 강철 선체에 기인한 3축 직교 영구자기장(Permanent Magnetic Field)의 영향 하에 있게 된다.

이들 3축 유도자기장을 각각 IVM (Induced Vertical

Magnetization), ILM(Induced Longitudinal Magnetization), IAM(Induced Athwartship Magnetization)이라 하며, 다음 그림 1 을 통해 왼쪽으로부터 각각의 방향으로 해당 함정이 받는 유도자기장의 방향을 살펴볼 수 있다[2].

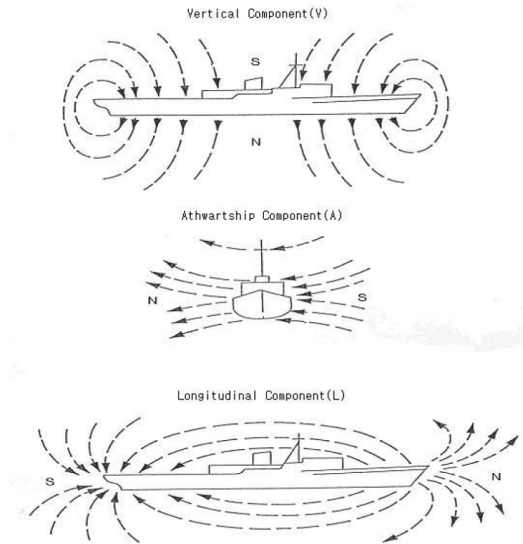


그림 1. 함정의 3축 유도자기장
Fig. 1 3-Axis Induced Magnetic Field of ship

이에 반해 영구 자기장은 함정 건조 단계에서의 다양한 열적 및 기계적 응력 또는 외부 충격 및 폭발 등의 용인에 의해 영구적으로 생성되는 신호 성분으로 동일한 함종의 경우에도 상이한 특성을 가진다. 따라서 영구 자기장 성분은 상용 수치해석 도구 등을 사용해도 예측이 매우 힘들다.

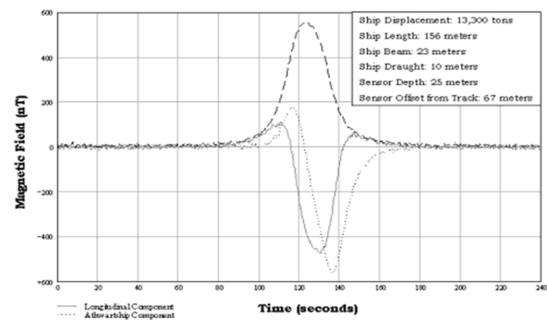


그림 2. 함정의 3축 영구자기장 특성
Fig. 2 Triaxial Permanent Magnetic Field of ship

함정의 자기 특성 값은 각 축 벡터 값을 합성 값으로 하는 자기장 총합(FE) 수식으로 표현될 수 있다.

$$F_E = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad \text{식(1)}$$

II. 2축/3축 Modeling & Simulation

국산 전력화된 재래식 기뢰는 체계 개발 이후 전력화 운용 기간이 20년이 넘었다. 당시 적용된 자력계는 다음 그림 3과 같이 2축 뿐이며, 자항기뢰와 같은 신규 수중무기체계에 적용될 자력계는 3축의 합성자기장 값을 모두 이용하여 자기장 총합을 완벽히 구현할 수 있도록 성능개선 해야 하고 Matlab 기반 시뮬레이션을 통해 2축과 3축 자력계의 탐지성능 차이를 먼저 확인하였다.

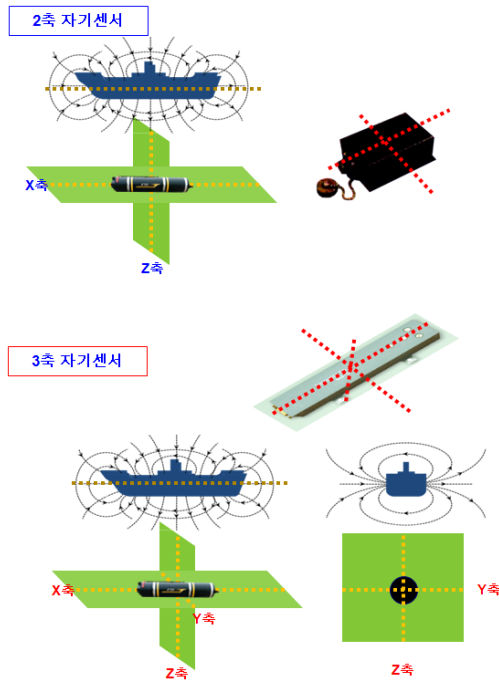


그림 3. 2축 자력계와 3축 자력계의 차이비교
Fig. 3 2-axis & 3-axis Magnetometer

자력계가 탐지하는 대상함정은 수상함 전단 중 지휘 함정에 해당하는 호위함급 이상의 크기를 갖는 대형함정으로 가정하고, 그 입력 값은 실측된 IVM, ILM,

IAM, PVM, PLM, PAM 각 채널값을 사용했으며, 수중 매설된 기뢰의 자력계를 on-top으로 함정이 지나가는 것으로 시뮬레이션 했고, 결과는 다음 그림 4와 같다.

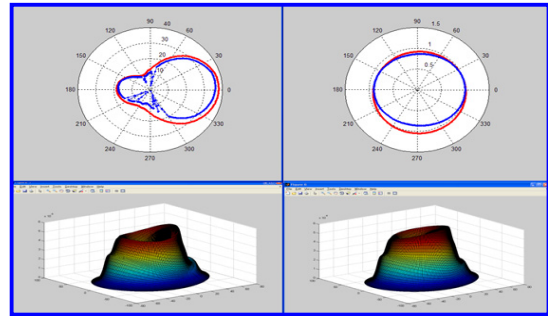


그림 4. 2축, 3축 탐지값 최소, 최대 비교
Fig. 4 Min/Max Magnetic Value of 2 / 3 Axis

자력계를 포함한 기뢰의 착저 자세가 동일하다고 가정하였을 경우 2축 자력계는 탐지 최대/최소 값도 편차가 있으며, 특히 방위별 탐지 가능 범위가 확연히 차이가 있음을 알 수 있다. 시뮬레이션을 토대로, 현존하는 기뢰의 대부분이 주 탐지 센서로 자력계를 사용하고 있지만 개발된지 오래된 구형 기뢰들이 대부분이며, 특히 우리나라가 보유하고 있는 기뢰들의 자력계는 단일 Search coil 또는 2축 뿐이며, 신규 무기체계로 자항기뢰 등을 개발하여 보유하려면 3축 자력계의 설계 및 적용이 필수적이라 하겠다.

III. 축소함정 Simulation 및 자기장예측

강자성 재질의 함정 선체에 의한 지구 자기장 외란 (Anomaly) 신호는 다음과 식 2와 같이 맥스웰 방정식 및 자속밀도 \vec{B} 와 자기장의 세기 \vec{H} 사이의 구성 방정식의 영향을 받게 된다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} \end{aligned} \quad \text{식(2)}$$

여기서, \vec{J} 는 전류 밀도, μ 는 인가 지구 자기장 하에서의 함정 재질의 투자율을 나타낸다. 만일 함정이

외부 지구 자기장 \vec{H}_0 에 놓이게 되면, 외부 지구 자기장에 의한 강자성 선체의 유도 자화에 의해 2차적으로 발생하는 자기장 \vec{H}_i 이 발생된다. 이 경우의 자기장의 세기는 아래 식 3으로 표현될 수 있다.

$$\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}_i \quad \text{식(3)}$$

일반적으로 대상 함정에 대한 자기 다이폴의 각 방향 성분별 크기(mx, my, mz)를 알고 있는 경우, 함정에 의해 발생하는 정 자기장 신호는 아래 식 4와 같이 비오-사바르(Biot-savart)의 법칙을 이용하여 임의 위치 및 심도별 자기장 신호 특성에 대한 예측이 가능하게 된다.

$$dB(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times \hat{r}}{r^2} \quad \text{식(4)}$$

상용 전자장 유한요소 해석 도구인 OPERA를 이용하여, 해상 시험 진행전 적함 수중 전자기 신호 예측과 육상 확인시험용 축소모형 제작을 위해를 위하여 잠수함을 다음 그림 5와 같이 모델링하였다.

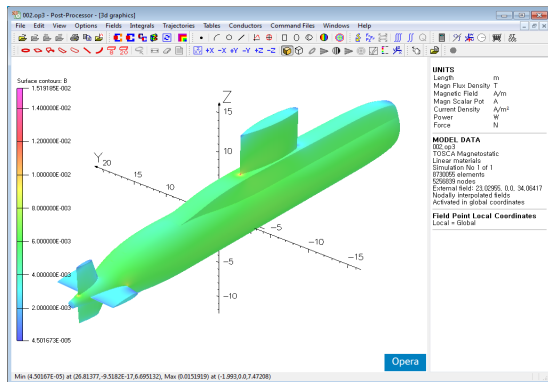


그림 5. 잠수함 모델링 결과
Fig. 5 Modeling result of Submarine

해석된 유도자기장 신호는 아래 그림 6과 같다. 이러한 함정 모델링을 이용한 해석 결과를 이용하여 적합한 수중 전자기 신호를 예측하고, 예측된 결과를 이용하여 신규 개발하는 3축 자력계의 자기 탐지 성능 예측 및 분석에 사용한다.

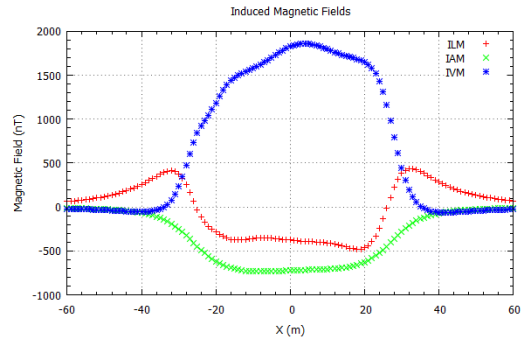


그림 6. 유도자기장 해석결과
Fig. 6 Result of Induce Magnetic Field

강자성체에 의하여 자기장을 변화시키는 원리는 첫째, 강자성체의 높은 투자율(permeability)에 의하여 자기력선이 강자성체에 빨려 들어가기 때문에 강자성체의 주변의 자기장의 세기가 불균일하게 되는 것과[3], 둘째, 강자성체 자체가 자화가 되어서 영구자석과 같이 균일 자기장이 분포하게 되는 것이 있다. 이들 자기장의 세기는 다음 그림 7과 같이 강자성체 자기이력곡선의 제2상한에서 강자성체 형상이방성에 의하여 결정되는 permeance line 에 의하여 결정된다. 즉 강자성체의 demagnetizing factor에 의하여 결정이 되며 자기장 방향으로 자성체의 길이가 길면 자화가 많이 높게 된다[4].

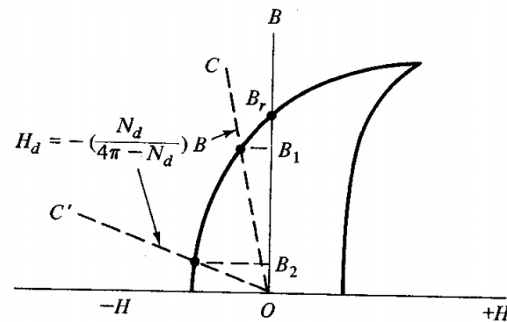


그림 7. 자기이력곡선 제2상한 Permeance line C
Fig. 7 2nd up-Limit Permeance Line C of Hysteresis Loop

자성체를 자화시키는 방법은 외부에서 자기장을 인가시키는 것이 일반적인 방법이지만, 또 다른 방법으로는 아래 그림 8과 같이 Joule 효과라고 하는 자기변형(magneto-striction)을 이용하는 방법이다.

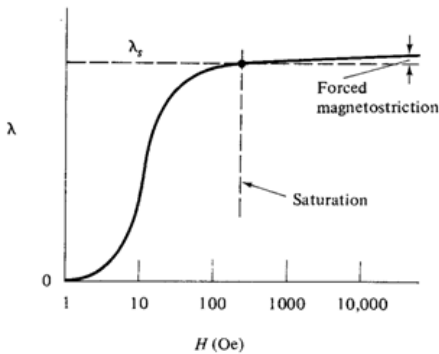


그림 8. 자성체의 자기변형특성 곡선
Fig. 8 Magnetostriction of Magnetic Substance

자기변형은 자성체가 자화 후 형상이 변하는 것으로 아래 식 5와 같이 정의 된다.

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \tag{식(5)}$$

자기변형특성을 갖는 자성체에 외부에서 변형력 (stress)를 인가하게 되면 자기 탄성에너지가 E_σ 발생 하게 되며 다음 식 6과 같다.

$$E_\sigma = \frac{3}{2} \lambda \sigma \sin^2 \theta \tag{식(6)}$$

여기서 각도 θ 는 변형력과 자화방향과의 사이의 각도이다. 따라서 자화는 정자기에너지와 자기탄성에너지의 합이 최소가 되게 자화의 방향이 결정되기 때문에, 강자성체에 변형력을 가하면 강자성체가 자화를 하게 된다. 그 예로 꼬마들이 기차선로에 못을 놓아두고 기차가 지나가게 되면 못이 얹어지고 자화가 된다. 선박의 경우도 파도나 하중 등에 의하여 선체 구조물의 철에 변형력이 가하여지고 이 변형력에 의하여 구조물이 자화가 되어 자기장이 발생하게 되고, 이를 탐지하는 것이 군사적으로 응용되고 있다.

IV. 신규 3축 자력계 설계

기뢰의 경우 일반적으로 오랜 기간(최대 연단위 이상) 동안 운용되므로, 자력계의 전력소모가 매우중요하

다. 예전 자력계들의 경우 안정성이 우수하지 못하여 센서 코어를 자화시키는 전력소비가 문제였다. 그 예로 기존에 사용되었던 자력계인 기존 2축 자력계의 경우 flux-gate Brown 링형 자력계를 사용했으며, 감지축이 2-축이고 선형도가 5%, 분해능이 0 nT, 측정 대역폭이 0~0 Hz(0:비문)였다.

flux-gate 센서는 링형 ferromagnetic core와 1차측 여기(Primary excitation) 코일과 2차측 측정(Secondary pick-up) 코일로 이루어 지며 코어는 주기적인 여기전류에 의해 코어의 투자율(permeability) 차이에 기인한 포화(saturation)를 반복하며, 측정코일에 의해 자기장 변화가 측정되는 원리를 갖는다[5]. 이러한 기본원리를 바탕으로 기존 2축 자력계는 다음 표 1과 같은 성능을 가졌다.

표 1. 기존 2축 자력계 성능
Table. 1 Conventional 2-axis Magnetometer spec

항목	특성	비고
감지축	2축(X, Z축)	
측정범위	+/- 1 Oe	
감도	0 nT (비문)	
선형도	±5 % 이하	
대역폭	0 ~ ∞ Hz (비문)	
잡음	∞ nT p-p(비문)	
데이터출력	Analog	
작동전압	5VDC (4~7 VDC)	
소비전력	75 mW@5VDC	
동작온도범위	0 ~ 35 °C	
보관온도범위	-30 ~ 60 °C	

한편, 최근 전자공학의 발달로 zero-drift 형 OP-Amp. 가 많이 개발되었고, 온도에 따른 offset drift가 0.01 $\mu V/^\circ C$ 정도로 우수해서 자력계에 지속 전원 공급과 안정상태에서의 측정이 필요 없어졌다. 예를 들면 ±100 μT 의 출력전압이 ±2 V 인 자력계의 경우 ±1 nT 의 자기장 값은 ±20 μV 에 해당되며 센서의 신호처리 과정에서 전압증폭을 100배 정도 고려해도 ±0.2 μV 정도에 해당되어 연산증폭기의 ±20 °C 의 온도 변화에 해당된다.

따라서 센서의 코일 권선, 코일포머의 열팽창계수, 전류를 측정하기 위한 shunt 저항의 온도 계수를 최소화 하면 측정하고자하는 시간에 전원을 켜서 측정을 하여도 수 nT의 변화 범위에서 측정이 가능하다.

표 2. 신규 3축 자력계 설계사양

Table. 2 New 3-axis Magnetometer spec

항목	특성	비고
감지축	3축(X,Y,Z축)	
측정범위	+/- 100 μ T	
감도	0 nT(비문)	
선형도	$\pm 1\%$ 이하	
대역폭	0 - ∞ Hz (비문)	가변가능
잡음	0OpT(비문)	필요시
데이터출력	RS422S, UART	Max 38,4kbps
작동전압	5VDC (4~9 VDC)	
소비전력	Max 00 W	
동작온도범위	-10 ~ 55 $^{\circ}$ C	습도 95% 이하
보관온도범위	-40 ~ 65 $^{\circ}$ C	

이런 이론적 분석결과로 Low drift를 갖는 신규 3축 자력계의 사양을 위 표 2와 같이 정하였다.

일반적인 자력계의 설계개념[6] 및 신호 흐름은 다음 그림 9와 같다.



그림 9. 일반적인 자력계의 구조
Fig. 9 General Magnetometer design

실 설계, 제작된 3축 자력계의 블록 다이어그램은 그림 10과 같으며 출력을 RS-422 시리얼데이터로 전송하여 후속 기뢰 운용 알고리즘에 쉽게 활용토록 했다.

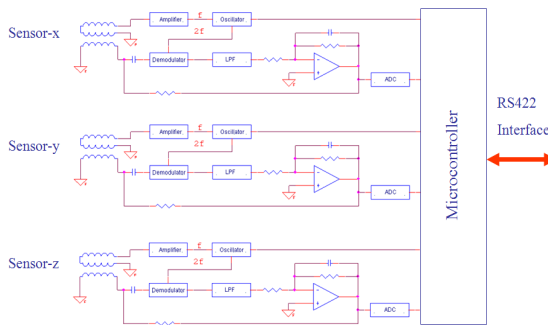


그림 10. 신규 3축 자력계 블록 다이어그램
Fig. 10 New 3-axis Magnetometer block-diagram

자력계의 성능 특징 중 중요한 점이 출력 신호의 선형성(Linearity)인데, 다음 그림 11은 신규 자력계의 선형성(Linearity)를 보여주고 있으며 이상적(ideal)인 신호출력의 선형 특징을 나타내고 있다.

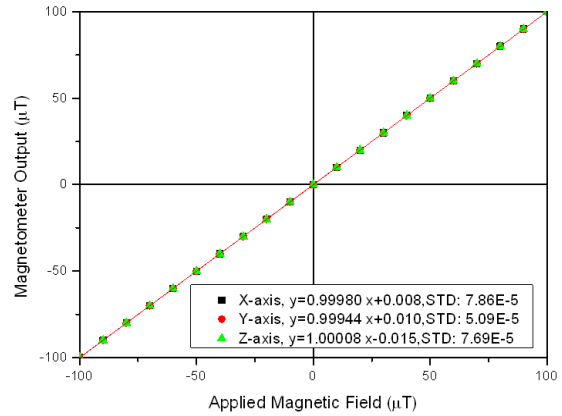


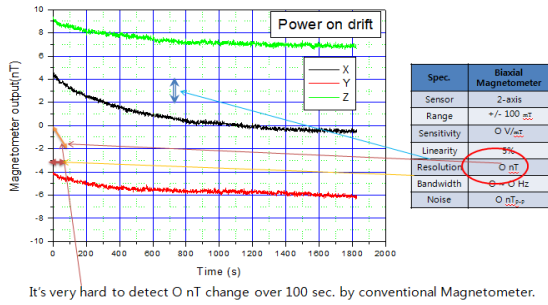
그림 11. 신규 3축 자력계의 선형성
Fig. 11 Linearity of New 3-axis Magnetometer

표적의 자기신호 변화를 감지해 내는 능력을 나타내는 신호 감도 면에 있어서는 다음 그림 13과 같이 0 nT (비문)의 분해능을 가졌던 기존 2축 자력계에 비해 약 0 nT(비문)의 분해능을 보임으로써 향후 실 해역에서의 탐지 효율이 획기적으로 개선될 것으로 기대되며, 실 해역 시험을 통해 입증해 나가도록 할 것이다.

신규 설계/구현된 3축 자력계의 특성을 좀 더 자세히 살펴 보면, 신규 3축 자력계의 전원을 켜고 동시에 자력계의 출력전압 변화를 측정하여 본 결과가 그림 12와 같다. 전원을 켜 후 1000초 정도의 안정화 시간이 필요하지만 drift 가 가장 큰 x-축의 경우를 보면 200초에 2 nT 정도 변화한다.

이를 기존 2축 자력계와 비교하여 보면 대역폭이 0 ~ ∞ Hz(비문) 이고 분해능이 0 nT(비문) 는 100초에 0 nT(비문)의 변화를 감지하지 못하는 것을 의미하기 때문에, 본 연구에서 사용한 자력계를 기존 2축 자력계를 대체하여 사용하여도 성능 면에서 아무런 문제가 없음을 보여주고 있다.

따라서 자력계의 전원을 계속 켜놓는 것이 아니라 필요시에 켜서 측정이 가능하기 때문에 시스템의 배터리 수명에 매우 긍정적인 영향을 줄 수 있다.



It's very hard to detect 0 nT change over 100 sec. by conventional Magnetometer.

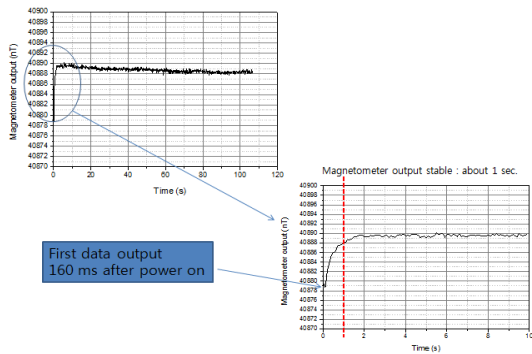


그림 12. 신규 3축 자력계 전원 인가 후 동작
Fig. 12 Power on Drift of New 3-axis Magnetometer

이렇게 설계/제작된 자력계의 프로토타입은 다음 그림 13과 같다.

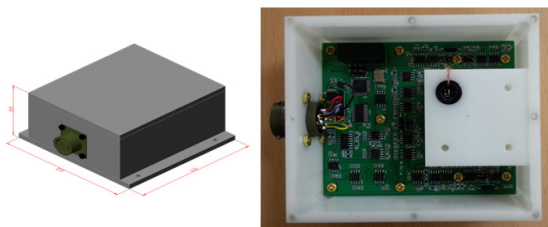


그림 13. 신규 3축 자력계 프로토타입 형상
Fig. 13 Prototype of New 3-axis Magnetometer

외국 유사 3축 자력계 중국방 시스템 분야에 많이 사용된다는 영국 Bartington 사의 대표적인 저전력 플렉스게이트형 자력계의 기능 성능 특징은 다음 그림 14와 같다.

신규 자력계와 비교해서 측정범위 $\pm 100 \mu\text{T}$, 선형도 $\pm 1\%$ 이하, 초기 응답시간 150ms 내외등으로 비슷하나, 최종 출력이 아날로그 형태로 출력되며, 대역폭이

30Hz이상(Mag648), 1kHz이상(Mag649)로 저주파 대역에서는 상대적인 성능이 많이 떨어짐을 알 수 있다. 또한, 외국 유사 3축 Flux-gate type 자력계들은 기능, 성능을 비교할 때 소비전력 감소 측면에서 본 연구가 주목하고 있는 Power on Drift 보다는 아래 그림 15와 같이 long-term drift 즉 오랜 시간 측정했을 때의 자기 특성치 변화를 위주로 설계하는 경향을 확인할 수 있다[7].

Electrical	
Supply voltage	+3.5V to 15V
Current consumption: Mag648 Mag649	3.6mA (typical earth field), 6mA max. 5.2mA (typical earth field), 5.6mA max.
Power-on surge	480mA maximum
Analogue outputs - full-scale voltages	$\pm 3\text{V}$ (balanced differential, each output 0.15V to 3.15V, 1.65V zero-field)
Output impedance	200 typical
Maximum load capacitance: Mag648 Mag649	> 10 μF bandwidth reduces when load capacitance > 1 μF
Maximum cable length	1.5km (must achieve 3.5V at supply voltage pin of Mag648/649)
Cable resistivity: Mag648/649 Mag648-MX & FL/Mag649-MX & FL Mag648S/Mag649S	920 Ω/km 920 Ω/km 390 Ω/km

Mag648 and Mag649 Specifications

Performance	
Number of axes	Three (Right Hand XYZ co-ordinate system)
Polarity	+ve non-inverting output when pointing North
Measuring range	$\pm 60\mu\text{T}$ or $\pm 100\mu\text{T}$
Bandwidth at 3dB: Mag648 Mag649	>30Hz >1kHz
Internal noise: low noise standard noise	<10pT $\text{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1Hz Between 10 and 20pT $\text{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1Hz
Scaling	50mV/ μT (40 μT) or 30mV/ μT (100 μT)
Start-up time	150ms
Warm-up time	15mins
Offset error	$\pm 100\text{nT}$ in zero field
Scaling error	$\pm 0.5\%$ at DC
Temperature coefficient of offset error	1nT/°C
Temperature coefficient of scale factor	100ppm/°C
Orthogonality error	Less than 1° error between axes
Linearity error	0.0033% (least squares fit)
Frequency response ($\pm 5\%$ deviation from DC): Mag648 Mag649	DC - 5Hz DC - 100Hz
Hysteresis	<2nT at 1 x full scale (when powered)
Excitation breakthrough: Mag648 Mag649	<10mV pk-pk at 4kHz <10mV pk-pk at 8kHz
MTBF	>21 years per MIL-217F-2(GB)

그림 14. 유사 3축 Flux-gate 자력계 성능특성
Fig. 14 Spec. of Mag-648 & 649

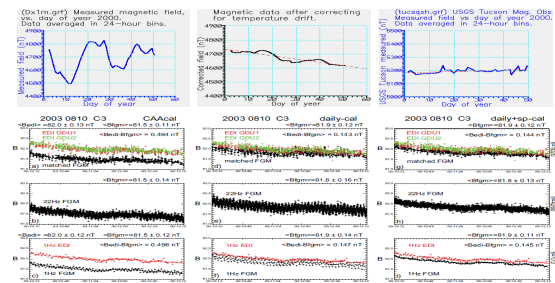


그림 15. 외국 유사 자력계 long-term drift 비교사례
Fig. 15 long-term drift of foreign Magnetometer

V. 비자성 측정장치 및 실험결과

설계, 제작된 신규 3축 자력계의 성능을 측정하기 위해서는 실 전투용 수상함정이나 잠수함 등을 운용하며 Beam depth(선폭의 길이와 동일한 수심 깊이)에서 실측하여 자기장 데이터를 분석하여야 한다. 그러나, 해상시험을 하기 위해서는 군 협조 및 동원되어야 하는 시험세력(표적함정 포함)을 운용하기에는 무리가 따르므로, 육상에서 축소형 모형함정을 만들고 데이터를 얻기 위한 스캔장치를 설계, 제작하여 신규 3축 자력계를 이용하여 지구자기장에서의 분포변화를 측정하였다.

다만, 육상에서의 자기장 측정 시 유의할 점으로는 실험실의 지구자기장 분포가 균일하여야 되고, 자력계를 움직여가면서 측정을 진행하게 되면 기구적으로 완벽하지 못하여 yaw, roll, pitch 등의 오차가 발생하면 자기장이 변화하게 된다. 예를 들면 x-축을 중심으로 1°만 회전하여도 z-축 방향의 지구자기장 값이 y-축에 $40,000\text{nT} \times \sin(1^\circ)$ 즉, 698 nT 가 변화하게 된다. 따라서 scan하는 동안 0.01도가 바뀌지 않게 설계를 하는 것이 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 피 측정 대상 물체(모형함정)가 움직이면서 자기장 분포를 측정하는 방법을 선택 하였다.

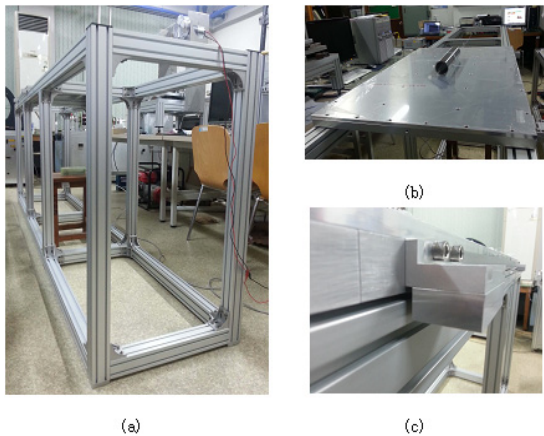


그림 16. 자기장분포 측정용 스캔장치 (a) 장치구조물 (b) 받침대 (c) 비자성 이동구조물
 Fig. 16 Scan equipment for Measuring (a) Equipment (b) supporting board (c) non-magnetic bearing

그림 16은 본 연구에서 제작한 스캔 장치의 사진으로 높이가 1000 mm, 폭이 600 mm, 길이가 3000 mm 되게 60 × 60 mm 의 알루미늄 프로파일을 사용하여 제작하였다. 구조물을 조이는 볼트 너트는 자기장에 영향이 없는 재질인 티타늄을 모두 사용하였다. 모형함정 등의 중량물을 이동하며 스캔하기 위해서는 베어링을 적용하여야 하는데 비자성체의 베어링이어야 하므로 세라믹 베어링을 사용하였다. 그림 16의 (c) 에서와 같이 각 모퉁이에는 2개의 세라믹 베어링이 붙어 있어서 수직의 하중을 받게 하는 것과 이송 중 이탈을 방지하기 위한 베어링이 부착되어 있다.

그림 17은 모형잠수함에 의한 지구자기장의 변화를 측정하는 사진이고, 그림 18은 그 측정결과이다. 이 실험에서 자력계는 함정으로부터 30 cm 아래에서 측정하였다. 여기서 x-축이 N-S 방향이고 y-축이 E-W방향, z-축이 수직 방향이다. 그림18에서 보면 x-축 방향의 자기장 변화가 4000 nT정도로 매우 큰데 이는 모형함정을 열차리를 하여 투자율이 냉간 압연시 보다 10배 정도 증가되었기 때문에 높아진 것으로 추정된다. y-축 방향의 자기장 변화는 거의 없고, z-축 성분은 대칭성을 보여주고 있다. 그림 18에서 자기장의 크기(total magnetic field)를 비교하여 보면 잠수함은 대칭이 잘되어 있음을 보여주고 있는데, 이는 특정 축의 자기장변화를 기폭시점으로 정하는 것보다 자기장의 크기를 추가하여 복합적으로 결정하는 것이 보다 더 정확도를 높일 수 있는 가능성을 보여 주고 있다.



그림 17. 모형잠수함의 자기장분포 측정
 Fig. 17 Measuring Magnetic Field test of Submarine

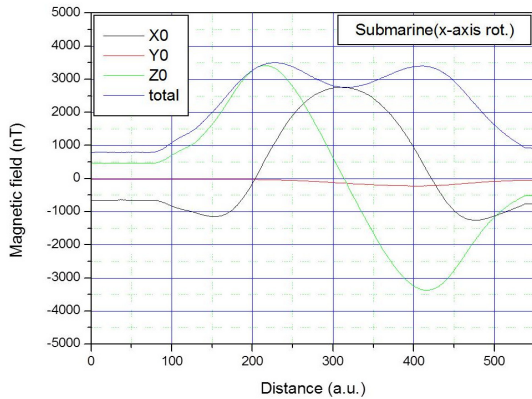


그림 18. 모형잠수함 N-S이동 시 측정결과(하부30cm 지점)
Fig. 18 Magnetic Field test of submarine(under 30cm)

VI. 결 론

2장의 시뮬레이션 결과처럼 2축 자력계는 착저 자세에 따라 탐지 방향별 자기장의 성분이 달라지므로, 2축만을 사용할 경우 왜곡된 자기장 분포를 측정할 수 있다. 따라서 자기장의 성분(X, Y, Z값)을 측정하지 않고 3축 자력계를 이용하여 Total field를 측정하면 기뢰의 착저 자세와 무관하게 측정이 가능하게 된다. 또한, 기존 2축 자력계는 Power on drift가 2nT/100s 이상이라서 초기 감응 후 알고리즘 등의 신호처리 시간 등을 고려하여 자력계에 상시 전원을 공급하고 자기장을 측정하였지만, 신규 3축 자력계는 Power on drift가 2nT/100s 보다 작기 때문에 전원을 켜고 동시에 초기감응에 대응할 수 있으므로 자력계에 필요시에만 전원을 공급하여 동작전원의 소비 전력을 감소하는데 큰 도움이 되도록 설계 되었다.

기존 자력계의 경우 2축의 자력계를 사용하였고 이를 신규 무기체계에 그대로 적용할 경우 기뢰를 의도하는 위치와 방향으로 놓기가 매우 어렵다. 따라서 2축의 자력계가 임의의 방위각과 roll 각으로 위치할 때 자기감지 특성을 확인하여 보아야한다. 이를 위하여 모형잠수함으로부터 얻은 자기장 신호에 대하여 함 접근방향을 x-축, y-축, z-축 대하여 30°, 60°, 90° 회전시키면서 자기신호의 변화 결과를 살펴보면 x-축 회전에 의하여 B_z 성분이 변화하고, y-축이나 z-축의 회전에 의하여 x-축의 자기장 값이 크게 변화하기 때문에 자력계가

놓여진 위치에서 무기체계의 roll 각 및 azimuth각을 알지 못하고 2-축의 자력계만을 가지고 함정의 중앙부분이 지나가는 것을 판단하는 것은 사실 불가능할 것으로 보인다. 따라서 3축 자기장성분을 측정할 수 있는 자력계가 필수이다. 3축의 자력계를 사용할 경우 역시 어려운 점은 자기장의 크기를 측정하면 자력계의 회전에 관계없이 자기장의 변화를 정확히 측정할 수 있으나 함정의 중앙부분을 정확히 찾아내는 것은 어려운 것으로 보인다. 이를 개선하려면 방위각센서를 사용하여 기뢰가 놓이게 되면 그 위치에서 roll과 azimuth 각을 측정하고 3축의 자력계 출력을 자북(x-축)을 기준으로 하는 회전 좌표계의 자기장 성분으로 분해하여 측정을 하면 B_x, B_y, B_z 성분으로부터 함정에 의한 자기장변화를 정확하게 측정할 수 있을 것으로 보이며, 추후 관련 연구를 진행하도록 한다.

REFERENCES

- [1] B. S. Lim, S. P. Hong, and Y. K. Kim, "A Study on Actuation Probability of Underwater Weapon Based on Magnetic Field," *Journal of The Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 17, no. 5, pp. 1253-1258, May. 2013.
- [2] John J. Holmes, *Exploitation of a Ship's Magnetic Field Signatures*, 1st ed. San Rafael, CA: Morgan & Claypool Publishers, 2006.
- [3] B. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley, 1997.
- [4] Fausto Fiorillo, *Measurement and Characterization of Magnetic Materials*, Elsevier, 2004.
- [5] Chew Soon Leong & Rashdi Shah Ahmad & Rosly Jaafar, "The Development of Fluxgate Magnetometer for Non-destructive Measurement", *Jurnal Teknologi* 34(C), pp.2, 2001.
- [6] Olivier Dezuari, Eric Belloy, Scott E. Gilbert, and Martin A. M. Giis, "New Hybrid Technology for Planar Fluxgate Sensor Fabrication, *IEEE Transactions on Magnetics* Vol. 35, pp. 1-3, 1999.
- [7] National Academy of Sciences, "Naval Mine Warfare : Operational and Technical Challenges for Naval Forces", National Academy Press, Washington D.C., pp 133-148, 2001.



임병선(Byeong-Seon Lim)

1993. 2. 아주대학교 전자공학과 공학사
2010. 8. 아주대학교 일반대학원 전자공학과 공학석사
2015. 2. 아주대학교 일반대학원 NCW학과 공학박사(졸업예정)
1994. ~ 현재, LIG넥스원(주) 수석연구원
※관심분야 : 마이크로프로세서 응용설계, FPGA, Embedded System & Programming, NCW



한승환(Seung-Hwan Han)

2011. 2. 아주대학교 전자공학부 공학사
2013. 2. 아주대학교 일반대학원 전자공학과 공학석사
2013. ~ 현재, LIG넥스원(주) 연구원
※관심분야 : Embedded System H/W, S/W



김영길(Young-Kil Kim)

1978. 고려대학교 전자공학과 공학사
1980. 한국과학기술원 산업전자공학과 공학석사
1984. ENST(France) 공학박사
1984. ~ 현재, 아주대학교 전자공학과 교수
※관심분야 : 마이크로파공학, 의료공학, Embedded System