



Received: 2025/11/22
Revised: 2025/12/05
Accepted: 2026/03/04
Published: 2026/03/31

***Corresponding Author:**

Jae-Hong Im

95-12, Noksansaneop-daero, Gangseo-gu, Busan,
Republic of Korea

Tel: +82-51-600-3713

Fax: +82-51-600-3790

E-mail: jhim@kte.co.kr

RTOS 기반 PLC를 이용한 잠수함용 소자 제어 시스템의 설계 및 축소모형을 통한 구현 및 검증

Design, Implementation, and Verification of a Submarine Degaussing Control System Using an RTOS-Based PLC and Scale Model

임재홍^{1*}, 조영환², 정현원³, 김영민³, 오현수⁴, 정범희⁵

¹(주)케이티이 기술연구소 책임연구원

²(주)케이티이 기술연구소 이사

³(주)한화오션 기본성능연구센터 책임연구원

⁴(주)한화오션 방산기술연구센터 책임연구원

⁵(주)한화오션 방산기술연구센터 선임연구원

**Jae-Hong Im^{1*}, Young-Hwan Cho², Hyun-won Jung³, Young-Min Kim³,
Hyun-Soo Oh⁴, Beom-Hee Jung⁵**

¹Senior manager, Technology Research Center, KTE

²Director, Technology Research Center, KTE

³Principal researcher, Fundamental Performance R&D Center, Hanwhaocean

⁴Principal researcher, Naval Ship System R&D Center, Hanwhaocean

⁵Senior researcher, Naval Ship System R&D Center, hanwhaocean

Abstract

본 연구에서는 고신뢰성 및 응답성 확보가 가능한 RTOS 기반 PLC를 이용하여 잠수함용 소자 제어 시스템을 설계하고, 축소모형을 통해 기능을 검증하였다. 제안된 시스템은 영구자기장과 유도자기장을 실시간으로 보상하여 잠수함의 자기 신호를 상쇄하도록 구성하였다. 축소모형 실험 결과, 자기장 상쇄 효과를 확인하였다. 본 연구는 향후 실제 함정 적용을 위한 성능 고도화 및 기능 통합 연구의 기초를 제공한다.

In this study, a submarine degaussing control system that can achieve high reliability and fast response was designed using a real time operating system (RTOS)-based programmable logic controller. Its functionality was verified through a scale model. The proposed system compensates for both permanent and induced magnetic fields in real time to reduce a submarine's magnetic signature. The scale model experiments confirmed the effectiveness of magnetic field reduction. This paper provides a foundation for further research on performance enhancement and functional integration for practical submarine applications.

Keywords

잠수함 축소모형(Submarine scale model), 소자제어시스템(Degaussing Control System), 코일전원공급기(Coil Power Supply Unit), 3축 자기센서 프로브(3-Axis Magnetic Sensor Probe)

Acknowledgement

본 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-23-024, 잠수함용 신형 소자장비 설계 기술, 2023~2028).

1. 서론

잠수함은 운용 중 선체 구조물과 내부 자성체에 의해 고유한 자기 신호(magnetic signature)가 형성되며, 이는 적의 MAD(magnetic anomaly detection) 및 자기감응기뢰 등에 노출될 수 있는 주요 요인으로 작용한다. 특히 현대 해양 환경에서는 자성 탐지 기술의 정밀도가 지속적으로 향상되고 있어, 잠수함의 생존성을 유지하기 위해서는 잠수함에서 발생하는 자기 신호를 최소화하는 고도화된 소자(degaussing) 기술이 필수적이다. 이를 위해 소자전류는 지구자기장, 유도자기장, 영구자기장 등 다양한 요인을 고려해 정밀하게 산출되어야 하며, 이러한 산출 과정의 정확성은 전체 소자 성능을

결정하는 핵심 요소가 된다. 그러나 실제 함정에서 소자 알고리즘이나 제어기를 직접 검증하는 것은 비용, 시간 및 함 운용 측면에서 제약이 크다. 따라서 실험 적용 이전 단계에서 축소모형을 기반으로 제어기 기능을 검증하는 방식은 기술적 타당성을 확보하고 위험 요소를 사전에 제거할 수 있는 매우 효율적인 접근 방식이다[1,2]. 축소모형은 실험 대비 크기와 소자코일 채널 수에 제한이 있으나, 시험에 사용되는 제어기 측면에서 실제 함정과 동일한 제어 구조·알고리즘·데이터 흐름·운용 절차를 적용할 수 있어 초기 연구 단계에서 실효성이 높다. 특히 잠수함용 소자제어기는 실시간 제어 성능, 신뢰성, 통신 안정성 등 다양한 요구조건을 만족해야 하며, 이를 위해 RTOS(real time operating system, 이하 ‘RTOS’) 기반 PLC(programmable logic controller, 이하 ‘PLC’)를 제어 플랫폼으로 채택하는 것은 실시간성·확장성·운용 신뢰성 측면에서 유리한 선택이다[3]. 이러한 배경에서 본 연구는 RTOS 기반 PLC 플랫폼을 이용해 소자제어기를 구현하고, 잠수함 축소모형 환경에서 소자 제어 시스템 소자 성능을 검증하고자 한다. 본 연구를 통해 실제 함정 적용 시 고려해야 할 요소들을 사전에 확인하고, 향후 자동화 기능의 고도화 및 실험 규모 검증 연구의 기반을 마련하고자 한다.

2. RTOS 기반 소자 제어 시스템 설계

2.1 소자 제어 시스템 요구사항 및 설계 목표

소자 제어 시스템은 함정의 위치 및 자세 변화에도 안정적으로 자기 신호를 상쇄할 수 있어야 하며, 응답성과 데이터 통신 신뢰성을 확보해야 한다. 본 연구의 설계 목표는 RTOS 기반 PLC의 실시간 제어 능력을 활용하여 이러한 요구를 만족하는 구조를 설계하고, 소자 제어 시스템 소자 성능을 검증하는 것이다.

2.2 소자 제어 시스템 하드웨어 구성

소자 제어 시스템은 소자제어기와 코일전원공급기, 3축 자기센서 프로브로 구성되어 있으며, Fig. 1은 소자 제어 시스템의 HW 구성도이다. 소자제어기는 PLC 플랫폼 기반으로 ST(structured text, 이하 ‘ST’) 언어로 제어 SW를 구현하였으며, HW는 전장 설계

와 외함 제작 중심으로 구성하였다. 코일전원공급기와 3축 자기센서 프로브는 PCB 설계부터 외함제작까지 모든 HW를 직접 개발하고, 센서 처리 및 PSU(power supply unit, 이하 ‘PSU’) 제어를 위한 펌웨어도 자체 구현하였다. Table 1은 장비별 개발 방식이다.

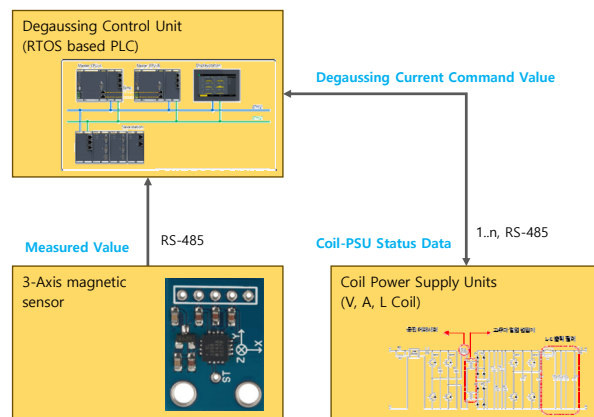


Fig. 1. Degaussing control system HW configuration

Table 1. Development details of degaussing control system components

Category	3-Axis sensor / Coil PSU	Degaussing Control Unit
HW	PCB-level design, MCU control board, custom enclosure	Wiring design, PLC I/O Setup, custom enclosure
SW	Firmware(C or C++), Interface, Sensor/PSU control	ST logic, Interface, degaussing current control
Development Scope	Full HW/SW developed from scratch	Application SW on PLC platform

2.3 제어 알고리즘 및 시스템 동작 흐름

소자 제어 알고리즘은 두 가지 방식의 소자 전류 산출 기능을 기반으로 동작한다. 첫 번째 방식은 3축 자기센서 실측 기반 방식으로, 소자제어기는 주기적으로 3축 자기센서 프로브로부터 환경자기장을 수신하고, 이를 이용하여 지구자기장을 추정한다. 이후 지구자기장과 유도자기장의 유도 관계에 따라 유도자기장을 계산하고, 이를 기반으로 유도자기장 소자 전류를 산출하는 방식이다. 두 번째 방식은 WMM(world magnetic model, 이하 ‘WMM’) 지구자기장맵 기반 방식으로, 전투체계로부터 주기적으로 입력정보를 수신받아 지구자기장맵에서 해당 위치·자세·시점에

서의 지구자기장을 계산한다. 이후 동일하게 유도자기장을 도출하고 이를 기반으로 유도자기장 소자 전류를 산출한다. 계산된 소자 전류 지령치를 코일전원 공급기와 연동하여 출력한다. 전체 과정은 RTOS에 의해 센싱-계산-전송 흐름으로 주기적으로 반복되며, 전투체계로부터 입력받은 운용 정보 또한 동일한 주기 내에서 처리된다. Fig. 2는 소자 제어 시스템 동작 흐름도이다.

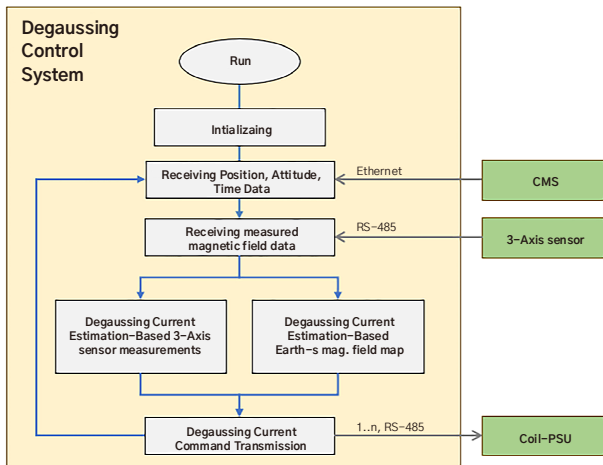


Fig. 2. Degaussing control system operation flowchart

통신 과정에서 오류가 발생한 경우에는 재전송 및 예외 처리 기능을 수행하여 실시간 제어 루프의 안정성을 유지한다. 이와 같은 구조는 입력 정보 변화에 즉각적으로 대응하면서 소자 전류 산출과 전송이 연속적으로 이루어질 수 있도록 설계되어, 시스템 전체가 시간 동기성을 유지하면서 안정적인 소자 기능을 수행하도록 한다.

3. 축소모형 소자 제어 시스템 실험 환경 및 절차

3.1 실험 목적

본 실험은 제안한 소자 제어 시스템이 실험 적용 전, 축소모형 환경에서 소자전류 산출 성능을 검증하는데 목적이 있다.

3.2 실험 환경 구성

축소모형은 실험과 동일한 재질을 사용하여 압력 선체 형상으로 제작되었으며, 내부에는 소자 코일 설

치를 위한 3축(V, A, L) 보빈 구조가 마련되어 있다. 소자코일은 V, A, L형으로 구성되며, 축소모형의 자기장 특성과 내부 공간 제약을 고려하여 실험 환경에서 구현 가능한 최적의 코일 수로 설계하였다. 실험은 국방과학연구소(ADD)가 구축한 비자성 실험실에서 수행되었으며, 이 실험실은 외부 자성 간섭을 최소화하기 위해 주요 구조물과 시험 장비를 비자성 재질로 구성하고, 실험 공간의 자화 요인을 억제한 환경을 제공한다. 실험실 내부에는 고정밀 표준 자기센서가 설치되어 배경 자기장을 실시간으로 감시하고, 실험 전후 자기장 변화를 확인할 수 있다. 또한 3축 자장발생 코일이 설치되어 있어 특정 전류 인가를 통해 다양한 지구자기장 조건을 모사할 수 있으며, 이를 통해 실험 중 기준 자기장을 안정적으로 재현할 수 있다. 이러한 비자성 시험 환경은 축소모형 주변의 불필요한 자성 영향을 제거하고, 소자제어기의 전류 산출 기능 검증에 필요한 정밀한 자장 조건을 확보하는 데 적합하다. 축소모형 기반의 소자 제어 시스템 실험 환경 구성은 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Configuration of experimental environment

Category	Component	Description
Scale Model	-	V, A, L Coils
Controller	RTOS-PLC	Current calculator
Sensors	3-axis Probe	Scale Model Mag. field
	Lab Sensor	Pre/Post Measurement
Mag. Field Generator	Mag. Field Gen.	Apply geomag. field
External Input	CMS Emulator	Time/Position/Attitude
PSUs	Bi-PSU	±00V, 00A, 10mA resolution
	Uni-PSU	+00V, 00A, 1mA resolution (with Polarity-Switching Relay)
Data PC	Logging PC	Control & Acquisition

3.3 실험 절차

실험 절차는 아래와 같이 구성된다. (2), (3)번은 3축 자기센서 실측값 기반, WMM 지구자기장맵 기반 두 가지 방식에 대해서 수행한다.

- (1) 영구자기장 소자 전류 산출
- (2) 합성자기장(영구+유도) 소자 전류 산출
- (3) 소자 성능 평가

4. 축소모형 소자제어 시스템 실험 결과

수행한 실험의 결과를 제시하고, 축소모형에서 발생하는 자기 신호에 대한 소자 성능을 분석한다. 소자 전·후 자기장은 실험실 자기장 센서로 실측하였다. Fig. 3는 소자 전 자기장이다. Table 3는 소자 전 3축 자기장의 Min, Max, PTP(peak-to-peak) 값이다.

$$Total = \sqrt{L^2 + V^2 + A^2} \tag{1}$$

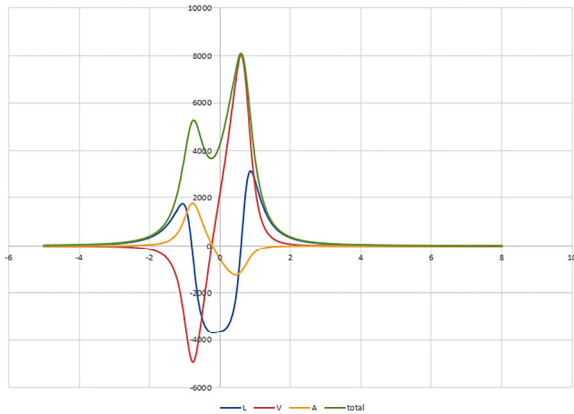


Fig. 3. Magnetic flux density before degaussing

Table 3. Magnetic flux density before degaussing

Axis	Min(nT)	Max(nT)	PTP(nT)
L-axis	-3672.4	3109.13	6781.5
V-axis	-4931.3	8038.52	12969.8
A-axis	-1231.4	1759.79	2991.22
Total	0.17907	8112.64	8112.46

4.1 실험 조건

- 지구자기장: magnetic field generator에서 인가
- 영구자기장: 사전 분리 실험값(고정 입력)
- 데이터 비교 방식: 소자코일 전류 인가 전·후
- 핵심 지표: 자기장 소자율
- B_{before} : 소자 전 자기 신호
- B_{after} : 소자 후 자기 신호

$$R = \frac{B_{before} - B_{after}}{B_{before}} \times 100(\%) \tag{2}$$

4.2 실험 결과

4.2.1 센서 실측값

- 소자 후 결과: Fig. 4, Table 4, Table 5

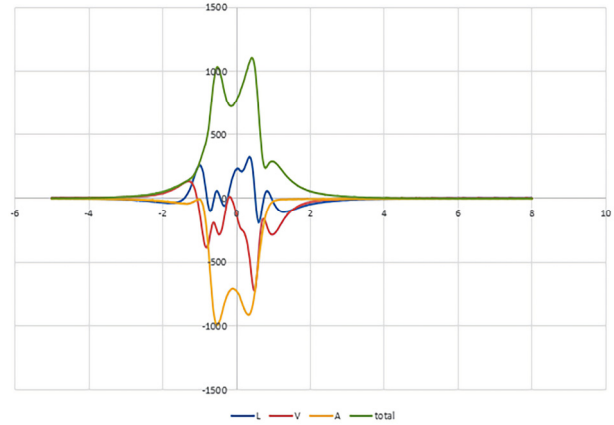


Fig. 4. Magnetic flux density after degaussing (auto-sensing)

Table 4. Magnetic flux density after degaussing (auto-sensing)

Axis	Min(nT)	Max(nT)	PTP(nT)
L-axis	-191.44	322.013	513.451
V-axis	-726.88	131.949	858.829
A-axis	-995.49	1.06755	996.561
Total	0.08491	1105.36	1105.27

Table 5. Magnetic flux density degaussing rate (auto-sensing)

Axis	Min(%)	Max(%)	PTP(%)
L-axis	94.79	89.64	92.43
V-axis	85.26	98.36	93.38
A-axis	19.16	1.06755	66.68
Total	52.59	86.37	86.38

4.2.2 지구자기장맵

- 소자 후 결과: Fig. 5, Table 6, Table 7

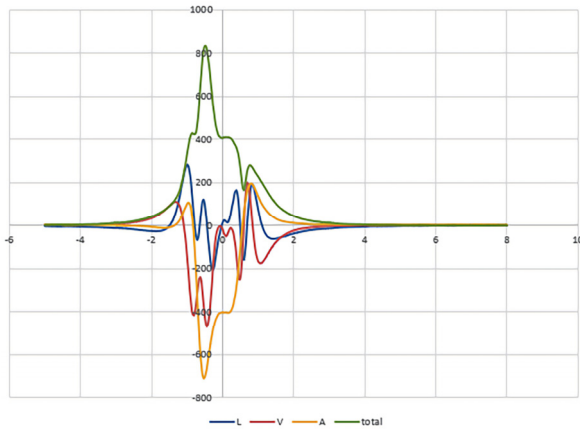


Fig. 5. Magnetic flux density after degaussing (auto-map)

Table 6. Magnetic flux density after degaussing (auto-map)

Axis	Min(nT)	Max(nT)	PTP(nT)
L-axis	-201.18	282.302	483.478
V-axis	-467.94	197.16	665.103
A-axis	-710.95	192.948	903.896
Total	830.173	0.10119	830.072

Table 7. Magnetic flux density degaussing rate (auto-map)

Axis	Min(%)	Max(%)	PTP(%)
L-axis	94.69	90.90	92.98
V-axis	90.26	97.56	94.83
A-axis	48.14	89.51	71.85
Total	91.67	89.85	89.84

5. 결론

본 연구에서는 소자 제어 시스템을 적용하여 축소 모형 환경에서 소자전류 산출 기능을 검증하였다. 실험 결과, 두 가지 소자전류 산출 방식 중 WMM 기반 방식이 상대적으로 더 우수한 소자 성능을 보였으며, 3축 자기센서 실측 기반 방식은 센서 민감도, 노이즈, 실험 환경의 영향으로 인해 성능 변동성이 나타났다. 이는 입력 데이터의 품질이 소자전류 산출 결과에 직접적인 영향을 미친다는 점을 의미한다. 또한 본 연구를 통해 축소모형 기반 환경에서 함정 소자제어 시스템의 구축과 시험이 가능함을 확인하였다. 실험 결과를 바탕으로 제어 알고리즘의 성능 향상 및 입력 정보 처리 정밀도 개선이 필요한 것으로 판단되며, 이러한 개선이 이루어진다면 실제 함정 적용 시 더욱 높은 소자 성능 확보로 이어질 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] Hyun-Ju Chung & Chang-Seob Yang, 'A Study on the Ship's Magnetic Field Reduction Technique Using Scaled Model Ship and Magnetic Sensor Probe,' Proceedings of 2023 KMS Summer Conference (pp. 313-314), 2023.
 [2] Hyun-Ju Chung, Chang-Seob Yang, & Woo-Jin Jung, 'A Magnetic Field Separation Technique for a Scaled Model Ship Through an Earth's Magnetic Field Simulator,' Journal of Magnetics, VOL. 20, NO. 1, 2015, pp. 62-68.
 [3] Joo-Hun Kim, Su-Jin Lee, & SuMin Nam, 'Hardware Design and Implementation of a Miniaturized Control System Using RTOS-Based PLC,' Journal of KNST, VOL. 7, NO. 4, 2024, pp. 463-468.