

수중 이동체의 전기장 신호 기반 위치추정을 위한 수중 전기장 배열센서의 전극 부설 위치 오차 보정 방법

김재선¹ · 이인규¹ · 배기웅² · 유선철^{1,+}

Calibrating Electrode Misplacement in Underwater Electric Field Sensor Arrays for the Electric Field-Based Localization of Underwater Vessels

Jason Kim¹, Ingyu Lee¹, Ki-Woong Bae², and Son-Cheol Yu^{1,+}

Abstract

This paper proposes a method to calibrate the electrode misplacement in underwater electric field sensor arrays (EFSAs) for accurate measurements of underwater electric field signatures. The electrode misplacement of an EFSA was estimated by measuring the electric field signatures generated by a known electric source and by comparing the measurements with the theoretical calculations under similar measurement conditions. When the EFSA measured the electric field signatures induced by an unknown electric source, the electric properties of the unknown electric source were approximated by considering the optimized estimation of the electrode misplacement of the EFSA. Finally, the measured electric field signatures were calibrated by calculating the theoretical electric field signatures to be measured with an ideally installed EFSA without electrode misplacement; the approximated electric properties of the unknown electric source were also taken into account. Simulations were conducted to test the proposed calibration method. The results showed that the electrode misplacement could be estimated. Further, the electric field measurements and the electric field-based localization of underwater vessels became more accurate after the application of the proposed calibration method. The proposed method will contribute to applications such as the detection and localization of underwater electric sources, which require accurate measurements of underwater electric field signatures.

Keywords: Sensor calibration, Sensor installation error, Point-dipole model, Underwater electric potential (UEP), Particle swarm optimization (PSO)

1. 서 론

수중 이동체의 이동 상황을 파악하기 위해 이동체로부터 발생한 수중 전기장 신호를 이용하는 위치추정 기술들이 연구되고 있다. 항만과 교량 주변에는 일반적인 선박들을 포함하여 수중 토목공사 등을 위한 다양한 수중 이동체들이 통행한다. 이러한 수중 이동체들의 이동 상황을 감지하는 기술은 선박과 수상/수중 구조물의 안전을 위해 중요하다. 전통적으로는 수중 이동

체의 위치를 파악하기 위해 이동체에 의해 발생한 수중 음향 및 자기장 신호를 분석하는 기술들이 개발되었다[1,2]. 최근에는 이동체의 더 정밀한 위치추정을 위해 이동체로부터 발생한 수중 전기장 신호를 이용하는 센서 융합 기술 등이 연구되고 있다[3]. 특히 군사분야에서는 수중 음향 및 자기장 신호에 대한 피탐 기술이 적용된 수중 이동체를 탐지하기 위해 수중 전기장 신호를 이용한 탐지 기술이 활발히 연구되고 있다[4].

수중 전기장은 전기적 성질을 지닌 수중 목표물의 탐지 및 위치추정 등에 유용하게 사용될 수 있는 전기적 신호이다. 다양한 수중 자연물 및 인공물은 수중 전원(electric source)으로 작용하여 수중에 전기장을 형성하는데 이러한 전기적 신호를 측정하여 수중 전원을 분석하는 기술들이 연구되고 있다[5-7]. 특히 수중 이동체의 주변에는 선체와 프로펠러를 구성하는 이중 금속 간의 부식 반응으로 발생한 전류와 부식 방지를 위한 음극방식 방법에 의해 인가된 전류 등으로 인하여 특유의 전기장이 형성된다[8,9]. 이러한 전기적 신호를 이용하여 수중 이동체의 위치추정 등에 활용할 수 있도록 수중 전기장 신호를 측정하기 위한 센서들이 개발되고 있다[10-12].

¹ 포항공과대학교 IT융합공학과(Department of Convergence IT Engineering, Pohang University of Science and Technology) C5, 77, Cheongam-ro, Nam-gu, Pohang-si, Gyeongsangbuk-do, 37673, Korea.
² 국방과학연구소 해양기술연구원(Agency for Defence Development, Maritime Technology Research Institute) P.O. Box 18, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51678, Korea
⁺Corresponding author: snycu@postech.ac.kr
(Received: Aug. 22, 2022, Revised: Aug. 31, 2022, Accepted: Sep. 15, 2022)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://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.

수중 전기장 센서는 복수의 전극, 전치증폭기, 그리고 신호처리 등으로 구성되어 수중 목표물로부터 발생한 전기장 신호를 측정하는 센서이다. 전기장 센서는 센서를 구성하는 전극들 사이의 전위 차를 감지하고, 감지된 신호를 증폭하고, 증폭된 신호를 주파수에 대해 처리하여 목표 주파수 대역의 전기장 신호 측정값을 제공한다. 수중 전기장 센서는 대표적으로 마주보는 세 쌍의 전극을 정육면체 형태로 배치하여 정밀한 3차원 전기장 신호를 측정하는 단일센서[13]와 일렬로 나열된 복수의 전극에서 여러 채널의 1차원 전기장 신호를 측정하여 원거리의 수중 목표물을 탐지하는 배열센서[14] 등이 있다. 본 연구에서는 원거리의 수중 이동체를 탐지하기 위해 배열센서를 사용하였다. 배열센서는 구성 전극들이 순서대로 케이블에 연결되고 선박 등을 통해 옮겨져 목표 부설 위치의 해수면 부근에서 하나씩 투하되는 방식으로 부설된다. 각 전극은 부설 중 전극에 작용하는 해류 및 코리올리 힘 등의 외력과 해저면의 불균일성 등으로 인해 목표 위치에 정확하게 부설되기 어렵다 (Fig. 1). 수중 이동체로부터 발생한 전기장 신호를 정확하게 측정하기 위해 이러한 전극 부설 위치 오차를 보정하는 기술이 필요하다.

수중 전기장 배열센서의 전극 부설 위치 오차는 수중 이동체의 전기장 신호 기반 위치추정 정확도에 영향을 미친다. 수중 이동체의 위치추정은 배열센서가 측정한 전기장 신호와 그 전기장 신호를 측정한 전극의 위치를 고려하여, 배열센서를 구성하는 전극들과 수중 이동체 사이의 상대 거리를 추정하는 방식으로 이루어진다. 따라서 수중 이동체의 정확한 위치추정을 위해서는 배열센서가 측정한 전기장 신호를 배열센서를 구성하는 전극들의 부설 위치 오차에 대해 보정하여야 한다. 지상에서는 전기장 배열센서가 날개에 부착된 기체 등이 폭풍의 위치를 정확히 탐지하여 안전하게 운행할 수 있도록 배열센서의 전극 설치 위치 오차를 보정하는 방법 등이 일부 연구되었으나[15], 수중에 부설된 전기장 배열센서의 전극 부설 위치 오차를 보정하기 위한 효과적인 방법 등은 연구가 필요하다. 본 논문은 배열센서 주변에 기지(known) 전기장 신호를 발생하는 신호발생장치를 기정(predefined) 경로를 따라 이동시켜 측정된 전기장 신호를 분석하여 배열센서를 구성하는 전극들의 부설 위치 오차를 추정하는 방법을 제안한다. 또한 추정된 전극들의 부설 위치 오차를 고려하여 측정된 전기장 신호를 부설 위치 오차 없이 이상적으로 부설된 배열센서가 측정했을 전기장 신호로 보정하는 방법을 제안한다. 제안 방법을 검증하기 위해 시뮬레이션 실험을 수행하여 배열센서를 구성하는 전극들의 부설 위치 오차 추정과 측정 전기장 신호의 보정 결과를 확인하였다.

2. 제안 보정 방법

본 논문은 수중 전기장 배열센서의 전극 부설 위치 오차를 보정하여 수중 목표물로부터 발생한 전기장 신호를 정확하게 측

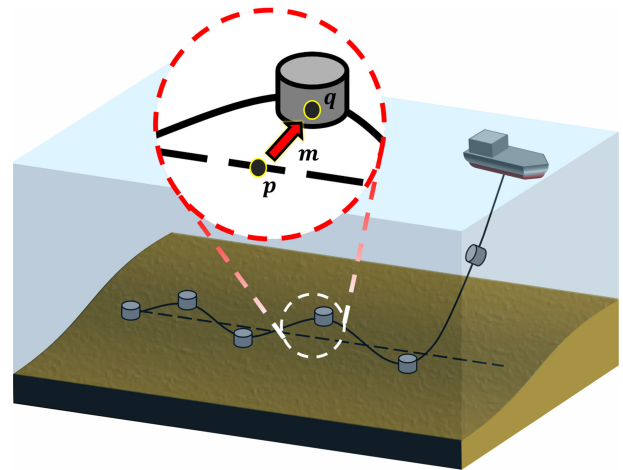


Fig. 1. Installation of electric field sensor array and misplacement (red arrow) of electrodes.

정할 수 있도록, 배열센서를 구성하는 전극들의 부설 위치 오차를 추정하고 추정된 부설 위치 오차를 기반으로 측정된 전기장 신호를 보정하는 방법을 제안한다. 수중 전기장 배열센서는 복수의 전극으로 구성되며, 각 전극은 부설 시 해류와 코리올리 힘 등의 외력과 해저면의 불균일성 등으로 인해 의도된 위치에 정확하게 부설되지 못한다 (Fig. 1). 배열센서를 구성하는 임의의 전극의 목표 부설 위치(p), 부설 위치 오차 (m), 그리고 실제 부설 위치(q)는 다음 3차원 벡터의 형태로 표현할 수 있다,

$$p_i = [p_{i,x} \quad p_{i,y} \quad p_{i,z}]^T, \tag{1}$$

$$m_i = [m_{i,x} \quad m_{i,y} \quad m_{i,z}]^T, \tag{2}$$

$$q_i = p_i + m_i, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}, \tag{3}$$

여기서 N 는 배열센서를 구성하는 전극들의 총 개수, i 는 배열센서를 구성하는 각 전극들에 순서대로 부여된 고유번호 (ID)이다. 배열센서는 구성 전극들 중 두 개씩의 전극들을 다양한 조합으로 선택하고, 선택된 각 전극조합의 두 전극 사이 전위차를 감지하는 방식으로 다채널 전기장 신호를 측정한다. 배열센서가 측정한 다채널 전기장 신호와 신호 측정을 담당하는 전극들의 고유번호(electrode ID)는 각각 다음 행렬의 형태로 표현할 수 있다,

$$E = [E_1 \quad E_2 \quad \dots \quad E_J]^T, \tag{4}$$

$$EID = \begin{bmatrix} eid_1 \\ eid_2 \\ \dots \\ eid_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} eid_{11} & eid_{12} \\ eid_{21} & eid_{22} \\ \dots & \dots \\ eid_{J1} & eid_{J2} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

여기서 J 는 배열센서가 측정하는 전기장 신호의 총 채널 수, E_j 는 배열센서의 j -번째 채널에서 측정된 전기장 신호, eid_j 와

eid_{j_2} 는 배열센서의 j -번째 채널 전기장 신호 측정을 담당하는 두 전극의 고유번호이다 ($1 \leq eid_{j_1}, eid_{j_2} \leq I$ 를 만족하는 정수).

본 연구에서는 배열센서 주변에 기지 전기장을 형성한 후 배열센서가 실제 측정된 전기장 신호와 유사한 측정환경에서 측정되어야 하는 이론적인 전기장 신호 사이의 오차를 분석하여 전극들의 부설 위치 오차를 추정하는 방법을 제안한다. 또한 추정된 전극들의 부설 위치 오차를 기반으로 미지의 수중 목표물로부터 측정된 전기장 신호를 보정하는 방법을 제안한다.

2.1 수중 전기장 배열센서 전극 부설 위치 오차 추정 방법

수중 전기장 배열센서가 측정된 다채널 전기장 신호를 배열센서의 전극 부설 위치 오차를 고려하여 보정하기 위해 우선 배열센서를 구성하는 각 전극의 부설 위치 오차를 추정하여야 한다. 본 연구에서는 부설된 배열센서 주변에 기지 전기장 신호를 발생하는 신호발생장치가 기정 경로를 따라 이동할 때 배열센서에서 실제 측정된 전기장 신호와 배열센서가 임의의 위치에 부설되었을 경우 측정되어야 하는 이론적인 전기장 신호 사이의 오차를 비교분석하여 배열센서를 구성하는 각 전극의 부설 위치 오차를 추정하는 방법을 제안한다.

배열센서의 측정 전기장 신호와 비교하기 위한 이론적 전기장 신호를 계산하기 위해 적절한 전기장 신호 수신 모델을 구성하여야 한다. 본 연구에서는 기지 전기장 신호를 발생하는 수중 이동체를 점 다이폴(point dipole) 집합으로 표현[12]하여 배열센서를 구성하는 각 전극의 전위[16]를 계산하고 배열센서가 측정된 다채널 전기장 신호를 모사할 수 있는 신호 수신 모델을 구성하였다. 수중 전원에서부터 발생한 전기장 신호에 대한 배열센서 전극들의 이론적 전위는 다음과 같이 계산될 수 있다,

$$\varphi(q_i, T, D) = \frac{1}{4\pi\sigma_0} \sum_{k=1}^K \frac{d_k \cdot r_k}{|r_k|^3}, \quad (6)$$

$$r_k = t_k - q_i, \quad (7)$$

$$T = [t_1 \quad t_2 \quad \dots \quad t_K]^T, \quad (8)$$

$$D = [d_1 \quad d_2 \quad \dots \quad d_K]^T, \quad (9)$$

여기서 $\varphi(\cdot)$ 는 전위를 계산하는 함수모델, σ_0 는 해수의 전기전도도, K 은 수중 전원을 구성하는 점 다이폴의 총 개수, d_k 은 수중 전원의 k -번째 점 다이폴의 다이폴모멘트를 의미하는 벡터, t_k 은 수중 전원의 k -번째 점 다이폴의 위치를 의미하는 벡터, r_k 은 수중 전원의 k -번째 점 다이폴과 배열센서의 i -번째 전극 사이의 변위를 의미하는 벡터이다. 이 때 배열센서 각 채널의 이론적 측정 전기장 신호는 측정을 담당하는 두 전극 사이 전위 차를 두 전극 사이 거리로 나눔으로써 계산할 수 있다,

$$E_j^{theo.}(q_{eid_{j_1}}, q_{eid_{j_2}}, T, D) = -\frac{\varphi(q_{eid_{j_2}}, T, D) - \varphi(q_{eid_{j_1}}, T, D)}{\|q_{eid_{j_2}} - q_{eid_{j_1}}\|}. \quad (10)$$

배열센서를 구성하는 전극들의 부설 위치 오차는 배열센서가 측정된 전기장 신호와 이론적인 전기장 신호 사이의 오차를 최소화하는 전극 부설 위치 오차를 탐색하는 방식으로 추정하였다. 오차를 최소화하는 전극 부설 위치 오차는 다음 목적함수를 최적화하여 추정되었다,

$$\operatorname{argmin}_{\{\hat{m}_1, \hat{m}_2, \dots, \hat{m}_N\}} \sum_{j=1}^J \{E_j^{meas.} - E_j^{theo.}(\hat{q}_{eid_{j_1}}, \hat{q}_{eid_{j_2}}, T^a, D^a)\}^2, \quad (11)$$

$$\hat{q}_{eid_{j_1}} = p_{eid_{j_1}} + \hat{m}_{eid_{j_1}}, \quad j \in \{1, 2, \dots, J\}, \quad (12)$$

$$\hat{q}_{eid_{j_2}} = p_{eid_{j_2}} + \hat{m}_{eid_{j_2}}, \quad j \in \{1, 2, \dots, J\}, \quad (13)$$

여기서 $E_j^{meas.}$ 는 배열센서 j -번째 채널의 측정 전기장 신호, \hat{m}_i 는 배열센서 i -번째 전극의 추정 부설 위치 오차, \hat{q}_i 는 배열센서 i -번째 전극의 추정 부설 위치, 그리고 T^a 와 D^a 는 각각 신호발생장치를 구성하는 점 다이폴들의 위치와 다이폴모멘트를 의미한다. 본 연구에서는 상기 목적함수를 최적화하기 위한 방법으로 입자군집최적화(particle swarm optimization) 기법을 사용하였다[17]. 입자군집최적화 기법은 동물 무리의 군집행동을 모방하여 최적화하고자 하는 목적함수의 전역 해를 반복적으로 (iterative) 탐색하는 알고리즘으로, 탐색 과정에서 목적함수의 미분 값 등을 사용하지 않으므로 상기 비선형 목적함수를 최적화하기에 적합하다.

2.2 수중 전기장 배열센서의 측정 전기장 신호 보정 방법

추정된 전극들의 부설 위치 오차를 고려하여 수중 전기장 배열센서가 측정된 미지의 수중 이동체로부터의 전기장 신호를 보정하는 방법을 제안한다. 제안 보정 방법은 다음 두 단계로 구성된다: 1) 배열센서를 구성하는 전극들의 추정 부설 위치와 미지의 수중 이동체로부터 측정된 전기장 신호를 이용하여 미지의 수중 이동체 추정, 2) 추정된 수중 이동체를 기반으로 배열센서를 구성하는 전극들이 목표 위치에 이상적으로 부설되었을 경우 측정되어야 하는 이론적인 전기장 신호를 계산. 배열센서가 측정된 전기장 신호와 이론적인 전기장 신호 사이의 오차가 최소화되도록 다음 목적함수를 최적화하여 미지의 수중 이동체를 추정하였다,

$$\operatorname{argmin}_{T^b, D^b} \sum_{j=1}^J \left\{ E_j^{meas.} - E_j^{theo.}(\hat{q}_{eid_{j_1}}, \hat{q}_{eid_{j_2}}, T^b, D^b) \right\}^2, \quad (14)$$

여기서 T^b 와 D^b 는 각각 미지의 수중 이동체를 구성하는 점 다이폴들의 추정 위치와 추정 다이폴모멘트를 의미한다. 배열센서를 구성하는 전극들이 의도된 위치에 이상적으로 부설되었을 경우 추정된 미지의 수중 이동체에 대해 측정해야 하는 이론적

인 전기장 신호, 즉 보정된 전기장 신호는 수식 (10)을 이용하여 다음과 같이 계산하였다,

$$E_j^{calib.} = E_j^{theo.} (p_{eid_1}, p_{eid_2}, \hat{T}^b, \hat{D}^b). \quad (15)$$

3.시뮬레이션 방법

제안된 수중 전기장 배열센서 전극 부설 위치 오차 보정 방법을 검증하기 위해 시뮬레이션 실험을 진행하였다. 시뮬레이션 실험에서 임의의 전극 부설 위치 오차를 가진 가상의 배열센서를 구성하고 그 주변에 기지 전기장 신호발생장치와 미지 수중 이동체를 이동하며 측정 전기장 신호의 보정 과정 및 결과를 확인하였다. 우선 제안 방법이 배열센서의 전극 부설 위치 오차를 추정할 수 있는지 확인하기 위해 시뮬레이션 실험에서 설정한 전극 부설 위치 오차와 제안 보정 방법을 통해 추정된 전극 부설 위치 오차를 비교하였다. 다음으로 제안 보정 방법이 배열센서가 측정한 전기장 신호를 보정할 수 있는지 확인하기 위해 제안 보정 방법을 통해 보정된 전기장 신호와 이상적으로 부설된 배열센서가 측정한 이론적 전기장 신호를 비교하였다. 마지막으로 제안 보정 방법을 이용한 배열센서의 측정 전기장 신호 보정이 수중 이동체의 위치추정 정확도 증가에 어느정도 영향을 미치는지 분석하기 위해 제안 보정 방법을 적용하기 전/후 수중 이동체 위치추정 오차를 비교하였다.

제안 보정 방법의 검증을 위한 시뮬레이션 실험을 진행하기 위해 임의의 설정의 전극 부설 위치 오차를 가진 배열센서, 전기장 신호발생장치, 그리고 수중 이동체 등을 구성하였다.

수식 (6)을 적용하여 시뮬레이션에서 사용된 배열센서의 전기장 신호 수신 모델을 구성하였다. 배열센서는 여섯 개의 전극으로 구성하였고, 각 전극은 수심이 30 m인 바다의 해저면에 Y 축 방향으로 30 m 간격으로 정렬되도록 목표 부설 위치를 설정하였다,

$$p_i = [0 \quad 30(i-3.5) \quad 30]^T, \quad i \in \{1, 2, \dots, 6\}. \quad (16)$$

각 전극의 부설 위치 오차는 X와 Y축 방향으로는 표준편차 2 그리고 Z축 방향으로는 표준편차 0.5의 정규분포 모델을 이용해 구성하였다 (Table 2). 배열센서는 일렬로 나열된 여섯 개의 전극 중 서로 인접한 두 전극 사이의 전기장 신호를 측정하여 총 다섯 개 채널의 신호를 측정하였다. 신호발생장치는 (-10 0 0) 위치부터 (10 0 0) 위치까지 직선 경로를 따라 20 m 거리를 이동하였고, 이동 경로의 방향으로 10 A·m의 다이폴모멘트를 가진 하나의 점 다이폴로 구성하였다. 배열센서는 신호발생장치가 5 m 이동할 때마다 신호발생장치에서 발생한 전기장 신호를 측정하였다. 수중 이동체는 (-100 0 15) 위치부터 (100 0 15) 위치까지의 첫 번째 경로 그리고 $(-\frac{100}{\sqrt{2}} \quad -\frac{100}{\sqrt{2}} \quad 15)$ 위치부터 $(\frac{100}{\sqrt{2}} \quad \frac{100}{\sqrt{2}} \quad 15)$ 위치까지의 두 번째

Table 1. Parameters for particle swarm optimization.

	Value	Definition
N_s	1000	Number of particles in the swarm
w	0.3	Particle velocity scaling factor
c_1	0.5	Particle acceleration weight towards the personal best (pbest)
c_2	0.5	Particle acceleration weight towards the global best (gbest)
T_{max}	100	Maximum number of iterations
ϵ	10^{-8}	Minimum change of swarm's best objective value before termination

Table 2. The predefined (m) and optimally predicted (\hat{m}) electrode misplacements and the corresponding misplaced distances. (Unit: m)

ID	Misplacement		Misplaced Distance		
	m	\hat{m}	$\ q-p\ $	$\ q-\hat{q}\ $	
1	X	-0.128	-0.453		
	Y	1.609	1.410	1.719	0.546
	Z	-0.591	-0.981		
2	X	1.312	1.325		
	Y	-0.783	-0.818	1.545	0.042
	Z	-0.226	-0.207		
3	X	0.923	0.868		
	Y	-3.124	-3.04	3.315	0.133
	Z	0.613	0.526		
4	X	-4.221	-4.354		
	Y	2.082	2.335	4.714	0.320
	Z	0.26	0.115		
5	X	-0.966	-1.076		
	Y	0.356	0.414	1.179	0.325
	Z	0.574	0.875		
6	X	-2.756	-2.915		
	Y	2.674	2.449	3.864	0.316
	Z	-0.433	-0.278		

경로를 따라 각각 200 m 거리를 이동하였고, 이동 경로의 방향으로 20 A·m의 다이폴모멘트를 가진 하나의 점 다이폴로 구성하였다. 첫 번째 경로에서는 수중 이동체가 배열센서의 전극 배열과 수직인 방향으로 그리고 두 번째 경로에서는 사선의 방향으로 접근하였다. 배열센서는 수중 이동체가 2 m 이동할 때마다

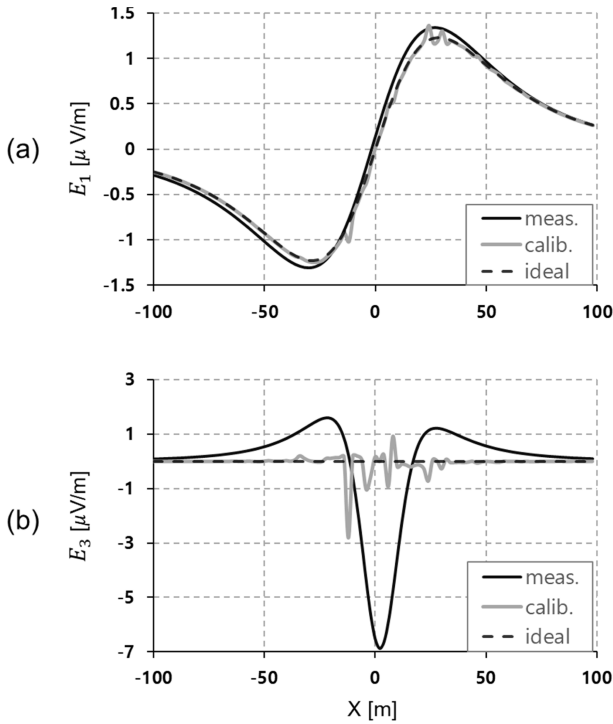


Fig. 2. The position of the underwater vessel vs. electric fields (a) at the first channel and (b) at the third channel of the EFSA.

다 수중 이동체에서 발생한 전기장 신호를 측정하였다. 해수의 전기전도도는 5.0 S/m로 설정하였다. Table 1은 입자군집최적화 방법에 사용된 제어변수이다. 최적화 중 배열센서를 구성하는 전극 및 수중 이동체가 존재하는 공간은 원점을 기준으로 X와 Y 축 방향으로 각각 1000 m 그리고 Z축 방향으로 20 m로 제한하였다. 최적화는 5회 반복시행하여 그 평균값을 최적값으로 사용하였다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1. 수중 전기장 배열센서 전극 부설 위치 오차 추정

수중 전기장 배열센서의 전극 부설 위치 오차는 설정된 부설 위치 오차와 유사하게 추정되었다 (Table 2). 제안 방법은 배열센서를 구성하는 전극들의 목표 부설 위치(p)를 기준으로 추정 부설 위치 오차(\hat{m})가 설정된 실제 부설 위치 오차(m)와 비교하여 크기와 방향이 모두 유사하도록 최적화하였다. 여섯 전극의 실제 부설 위치와 목표 부설 위치 사이의 평균 오차는 2.72 m 이었고, 실제 부설 위치와 추정 부설 위치 사이의 평균 오차는 그보다 약 89.7% 작은 0.28 m이었다.

4.2. 수중 전기장 배열센서 측정 전기장 신호 보정

수중 전기장 배열센서의 측정 전기장 신호는 최적화된 추정

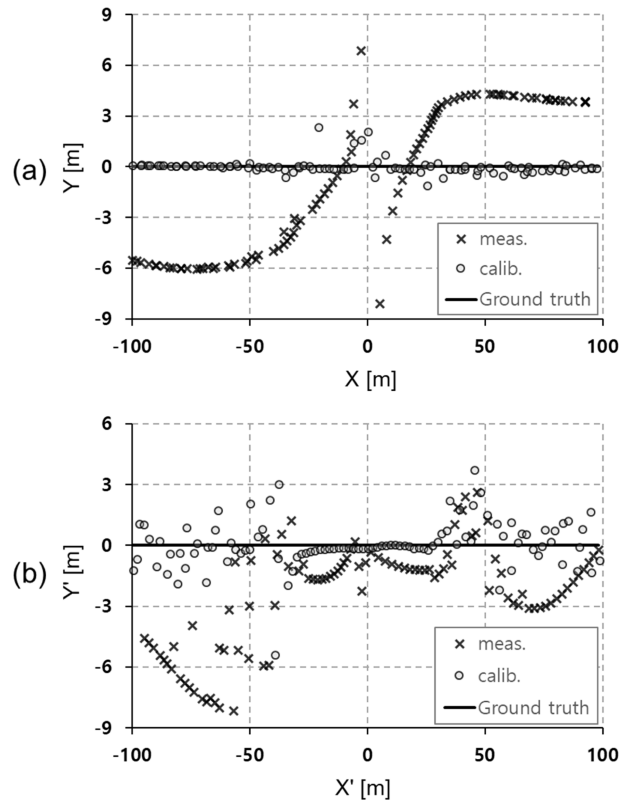


Fig. 3. Localization of underwater vessel with electric field measurements before calibration and after calibration. The vessel followed (a) perpendicular path and (b) diagonal path toward the sensor's electrode alignment.

부설 위치 오차를 기반으로 이상적으로 부설된 배열센서가 측정하였을 전기장 신호로 보정되었다. Fig. 2은 수중 이동체가 첫 번째 경로를 따라 이동하였을 때, 수중 이동체로부터 가장 먼 전극으로 구성된 채널($j=1$)과 가장 가까운 전극으로 구성된 채널($j=3$)에서 이상적으로 부설된 배열센서의 이론적 전기장 신호, 보정 전 (측정) 전기장 신호, 그리고 보정 후 전기장 신호를 보여준다; 두 채널 모두 보정 후 전기장 신호가 보정 전 전기장 신호보다 이상적 전기장 신호와 더 유사함을 확인할 수 있다. 수중 이동체의 두 가지 이동 경로에 대해, 다섯 채널의 보정 전 전기장 신호와 이상적 전기장 신호 사이의 평균 절대 오차는 각각 0.46 $\mu\text{V/m}$ 와 0.49 $\mu\text{V/m}$ 였고; 보정 후 전기장 신호와 이상적 전기장 신호 사이의 평균 절대 오차는 각각 0.05 $\mu\text{V/m}$ 와 0.06 $\mu\text{V/m}$ 였고; 전기장 신호 측정 오차는 보정 전과 비교하여 각각 89.1%와 87.8% 감소하여 두 가지 경로 모두에서 전기장 신호 보정이 이루어 졌음을 확인하였다.

4.3. 수중 이동체 위치추정

전기장 신호 기반 수중 이동체의 위치추정은 배열센서의 전극 부설 위치 오차 보정 후가 보정 전보다 더 정확하였다. Fig.

Table 3. Averaged simulation results before and after calibration.

	Before calibration	After calibration
Electrode misplacements	2.72 m	0.28 m
Electric field measurement errors		
Path 1	0.46 $\mu\text{V/m}$	0.05 $\mu\text{V/m}$
Path 2	0.49 $\mu\text{V/m}$	0.06 $\mu\text{V/m}$
Localization errors		
Path 1	7.65 m	2.46 m
Path 2	6.16 m	2.20 m

3(a)는 수중 이동체가 첫 번째 경로를 따라 이동하였을 때 이동체의 위치추정 결과를 보여준다. 이동체의 위치추정 오차는 이동체의 전체 경로에 대해 보정 전 7.65 m 그리고 보정 후 2.46 m로 보정 후 위치추정 오차가 약 68.8% 감소하였다. Fig. 3(b)는 X와 Y축이 시계 방향으로 45도 회전한 좌표계에서, 수중 이동체가 두 번째 경로를 따라 이동하였을 때 이동체의 위치추정 결과를 보여준다. 이동체의 위치추정 오차는 이동체의 전체 경로에 대해 보정 전 6.16 m 그리고 보정 후 2.20 m로 보정 후 위치추정 오차가 약 64.3% 감소하였다.

5. 결 론

본 논문은 수중 전기장 배열센서의 측정 전기장 신호를 기반으로 수중 이동체의 위치를 추정할 경우 정밀한 위치추정을 위하여 배열센서가 측정된 전기장 신호를 배열센서의 전극 부설 위치 오차를 고려하여 보정하는 방법을 제안한다. 제안 보정 방법은 지지 전기장 신호발생장치를 이용하여 배열센서를 구성하는 전극들의 부설 위치 오차를 추정하는 단계, 추정된 전극들의 부설 위치 오차를 고려하여 측정되는 전기장을 발생하는 수중 이동체를 추정하는 단계, 그리고 추정된 미지의 수중 이동체를 기준으로 이상적으로 부설된 배열센서가 측정했을 이론적인 전기장 신호를 계산하는 단계로 구성된다. 제안 방법은 전기장 신호발생장치와 수중 이동체를 점 다이폴의 집합으로 표현하여 이론적 계산을 위한 전기장 신호 수신 모델을 구성하였고, 배열센서의 전극 부설 위치 오차와 수중 이동체를 구성하는 점 다이폴 집합의 추정을 최적화하기 위해 입자군집최적화 방법을 사용하였다. 시뮬레이션 실험을 통해 제안 방법을 검증하였고 실험 결과 제안 방법이 배열센서의 전극 위치 오차를 추정하고 측정된 전기장 신호를 보정할 수 있음을 확인하였다 (Table 3). 본 논문에서 구성한 시뮬레이션 실험에서 수중 이동체가 배열센서의 전극 배열과 수직인 방향 그리고 사선 방향으로 두 가지 방향에서 접근하였을 때, 배열센서의 전기장 신호 측정 오차는 보정 전과 비교하여 보정 후에 각각 89.1%와 87.8% 감소하였다. 수중 이동체의 위치추정 오차는 보정 전과 비교하여 보정 후에 각각 68.8%와 64.3% 감소하였다. 제안

된 수중 전기장 배열센서 전극 부설 위치 오차 보정 방법은 수중 전기장 신호의 정확한 측정을 요구하는 수중 목표물 탐지 및 위치추정 등의 향후 응용연구에 기여할 수 있다.

감사의 글

This work was supported by the Agency for Defense Development by the Korean Government (UD200004DD).

REFERENCES

- [1] S. Kim, B. Ku, W. Hong, and H. Ko, "Performance comparison of target localization for active sonar systems", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 44, No. 4, pp. 1371-1380, 2008.
- [2] S. Bian, P. Hevesi, L. Christensen, and P. Lukowicz, "Induced magnetic field-based indoor positioning system for underwater environments", *Sensors*, Vol. 21, No. 6, p. 2218, 2021.
- [3] E. Dalberg, A. Lauberts, R. K. Lennartsson, M. J. Levonen, and L. Persson, "Underwater target tracking by means of acoustic and electromagnetic data fusion", *2006 9th International Conference on Information Fusion*, pp. 1-7, Florence, Italy, 2006.
- [4] B. Sun, B. Yan, J. Zhang, and S. Hu, "Ship tracking based on underwater electric potential", *Math. Probl. Eng.*, Vol. 2018, pp. 1-8, 2018.
- [5] R. A. S. Gehrmann *et al.*, "Marine mineral exploration with controller source electromagnetics at the TAG hydrothermal field, 26°N mid-Atlantic ridge", *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 46, No. 11, pp. 5808-5816, 2019.
- [6] M. Dhanak *et al.*, "AUV-based characterization of EMF emissions from submerged power cables", *OCEANS 2015 - Genova*, pp. 1-6, Genova, Italy, 2015.
- [7] D. Schaefer, J. Doose, M. Pichlmaier, A. Rennings, and D. Erni, "Conversion of UEP signatures between different environmental conditions using shaft currents", *IEEE J. Ocean. Eng.*, Vol. 41, No. 1, pp. 105-111, 2016.
- [8] Y.-S. Kim, K.-M. Kim, S. Lee, and J.-G. Kim, "Effect of temperature and flow velocity on the cathodic protection of ships and underwater electromagnetic signatures", *Korean J. Met. Mater.*, Vol. 55, No. 5, pp. 348-356, 2017.
- [9] H.-J. Chung, C.-S. Yang, and J.-J. Jeon, "A study on analysis method of underwater electric field signature due to ship's corrosion and corrosion protection system", *J. KIMS Technol.*, Vol. 11, No. 2, pp. 43-52, 2008.
- [10] Z. Wang, M. Deng, K. Chen, M. Wang, Q. Zhang, and D. Zeng, "Development and evaluation of an ultralow-noise sensor system for marine electric field measurements", *Sens. Actuator A Phys.*, Vol. 213, pp. 70-78, 2014.
- [11] K.-W. Bae, C.-S. Yang, S.-H. Han, S.-M. Jeoung, and H. -J. Chung, "Low-noise preamplifier design for underwater electric field sensors using chopper stabilized operational

- amplifiers and multiple matched transistors”, *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 31, No. 2, pp. 120-124, 2022.
- [12] S. Lee, C.-S. Yang, and H.-J. Chung, “Development of multi-rod type Ag-AgCl electrodes for an underwater electric field sensor”, *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 31, No. 1, pp. 45-50, 2022.
- [13] H.-K. Jung, S.-H. Cho, H. Lee, and H. Rim, “3-Axis electric field sensor for underwater”, Korea Patent 10-1643959-0000, 25 Jul., 2016.
- [14] S.-H. Cho, H.-K. Jung, H. Lee, H. Rim, and S. K. Lee, “Real-time underwater object detection based on DC resistivity method”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 54, No. 11, pp. 6833-6842, 2016.
- [15] D. M. Mach and W. J. Koshak, “General matrix inversion technique for the calibration of electric field sensor arrays on aircraft platforms”, *J. Atmos. Ocean Technol.*, Vol. 24, No. 9, pp. 1576-1587, 2007.
- [16] B. B. Laud, *Electromagnetics*, 2nd ed., New Age International, p. 25, 1987.
- [17] Y. Peng, J.-f. Cheng, and R.-x. Jiang, “Inversion of UEP signatures induced by ships based on PSO method”, *Def. Technol.*, Vol. 16, No. 1, pp. 172-177, 2020.