

## 수중 전기장 센서용 다중 막대형 은-염화은 전극 개발

이상규<sup>1,\*</sup> · 양창섭<sup>1</sup> · 정현주<sup>1</sup>

### Development of Multi-rod Type Ag–AgCl Electrodes for an Underwater Electric Field Sensor

Sangkyu Lee<sup>1,\*</sup>, Chang-Seob Yang<sup>1</sup>, and Hyun-Ju Chung<sup>1</sup>

#### Abstract

Multi-rod type Ag–AgCl electrodes have been developed for use in underwater electric field sensors. The developed cylindrical electrode had a diameter of 50 mm and a height of 130 mm. The electrode had five Ag–AgCl rods with a diameter of 2 mm and a height of 80 mm to enlarge the reaction surface area. Each Ag–AgCl rod was fabricated under the same conditions as the usual anodizing method in an electrolyte. The two developed electrodes were placed in the center of a 500-mm long, 400-mm wide, and 300-mm high acrylic tank filled with artificial seawater, at an interval of 100 mm, to evaluate their characteristics as uniaxial underwater electric field sensors. The underwater external electric field was generated using titanium plate electrodes installed at both ends of the tank. The noise level at 1 Hz of the developed electrode was approximately 3.7 nV/√Hz. The reception of the underwater electric field signal using the developed electrode was linear, within an error of approximately 0.6 %, in the range of 1–10000 μV/m at 1 Hz. In addition, its frequency response was flat within an error of 1.1 % in the range of 1–1000 Hz at 10000 μV/m.

**Keywords:** Underwater Electric Field Sensor, Ag–AgCl Electrode, Multi-rod.

#### 1. 서 론

수중 전기장 센서는 해수를 통해 흐르는 전류에 기인한 수중 전기장 신호를 측정하는 센서이다. 수중 전기장 신호는 수중에 일정한 간격으로 배치된 센서 전극으로부터 전위 차를 감지하여, 신호 증폭기를 통해 미세한 신호를 증폭하고 필터링하여 원하는 주파수 대역의 신호를 측정한다. 군사 선진국들은 이미 수중 전기장 센서를 활용하여 천해 환경에서의 수중 기동 표적을 탐지하는 연구를 활발히 진행하고 있으며[1], 해수 및 해저면 하부 매질의 전기적 물성이 다르다는 성질을 이용하여 해저 지하 자원 탐사(MMT, CSEM)용으로도 활용되고 있다[2].

수중 전기장 센서 전극은 센서 성능에 가장 큰 영향을 미치는 구성품이며, 주로 은-염화은 전극이 사용된다. 은-염화은 전

극은 비분극(non-polarizable) 전극으로 전해질 내에서 높은 전위 안정성, 반복성, 저 잡음성 등 전기화학적 특성이 우수한 것으로 보고되고 있다[3,4]. 이와 같은 특성으로 인해 은-염화은 전극은 기준 전극, 생체신호 측정 센서, 산소센서, 염화이온 센서 등 다양한 분야에서 활발하게 연구되고 활용되고 있다[5-8]. 은-염화은 전극은 일반적으로 은 막대를 염소 이온이 포함된 전해질 내에서 전류를 흘려 은 표면을 양극산화하는 방식으로 제작된다. 양극산화 시 사용되는 전해질, 인가 전압 또는 전류 등 양극산화 조건에 따라 은 표면에 염화은 생성 과정이 변하며, 은-염화은 전극의 특성도 변하게 된다[5,9].

전기장 센서의 성능은 자체잡음준위 (self-noise level), 동적 범위(dynamic range), 주파수 응답(frequency response)등으로 평가된다[10]. 특히, 수중 전기장 센서에는 자체잡음준위가 가장 중요한 요소이며, 센서의 응용분야에 따라 자체잡음준위의 요구 수준은 가변적이다. 수중 전기장 센서의 자체잡음준위는 센서 전극의 전기화학 반응 표면적 제공급에 반비례하는 것으로 보고되었으며[11], 센서 전극의 표면적 확대를 통해 센서의 자체잡음준위 감소를 위한 연구가 활발하게 진행되어 왔다 [12-14]. 은 막대보다 표면적을 훨씬 증가시키기 위해서 직경 10 mm 은 튜브[12]나 은 도금된 다공성 탄소 폼(carbon foam)을 양극산화하여 은-염화은 전극을 제작한 결과가 발표되었다[13]. 또한, 분말 소결 방법(powder sintering)으로 반응 표면적이 넓은 다공성 은-염화은

<sup>1</sup>국방과학기술연구소 해양기술연구원 (Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development)

Jinhae P.O. Box 18, Changwon, Gyeongnam, 51678, Korea

\*Corresponding author: pomula@add.re.kr

(Received : Jan. 10, 2022, Revised : Jan. 18, 2022, Accepted : Jan. 22, 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.

전극을 제작하는 연구 결과가 발표되었다[14]. 그러나 이와 같이 전극의 반응 표면적 증대를 위해 전극의 형태가 변경될 때마다 최적의 은-염화는 전극 제작 공정 조건을 도출해야하는 어려움이 있다.

본 논문에서는 다중 막대형 은-염화는 전극을 제작하고 전극의 특성을 실험한 결과를 기술하였다. 상대적으로 단순하게 전해질 내에서 양극산화하는 방법으로 은-염화는 막대를 제작했다. 그리고 전극의 표면적 확대를 위해 동일한 공정으로 제작된 5개의 은-염화는 막대를 이용하여 수중 전기장 센서용 은-염화는 전극을 제작하였다. 제작된 은-염화는 전극 2조를 소형 수조 내에서 설치하여 전극의 자체잡음준위를 측정하고, 수중 전기장 신호 수신에 대한 동적 범위, 주파수 응답, 고조파 왜곡 특성 등을 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 다중 막대형 은-염화는 전극 제작

다중 막대형 은-염화는 전극의 구조는 Fig. 1과 같다. 전극은 직경이 50 mm, 높이가 130 mm인 원통형 구조로 설계되었다. 전극 제작/조립을 위한 첫번째 단계로, 전극 내부에 해수와 전기화학 반응을 하는 직경 2 mm, 높이가 80 mm인 은-염화는 막대 5개를 가이드블록에 고정하고, 상부에서 은 막대를 굽혀 실버 페이스트로 신호선을 연결했다. 가이드 블록 하부는 우레탄으로 몰딩 처리하여 가이드 상부가 방수 되도록 하였다. 그 후 가이드 블록, 하우징 몸체, 상부 커버를 조립하고 상부 커버 내부는 우레탄으로 몰딩 처리 하였다. 몰딩재가 모두 경화된 후에 하우징 몸체 내부에 튜브형 해수 필터를 삽입하고 내부에 염화은/실리카 분말 혼합물을 교반기로 혼합 후 채워 넣고 하부 커버를 조립하였다. 조립된 전극은 신호 증폭기에 연결되도록 신호선 끝단에 바나나 커넥터를 부착하여 전극 제작을 완료했다. 개발 전극의 상/하부 커버, 하우징 몸체, 가이드 블록은 아세탈로 제작되었고, 해수 필터 재질은 폴리에틸렌이다.

개발 전극의 각 구성품은 수중 전기장 센서 전극으로 해수 내에서 전극을 사용할 때 안정적으로 해수의 전위를 측정하도록 설계되었다. 하우징 몸체 측면에는 45° 등각으로 8개의 장공이 있어 전극 내부로 해수 유입을 용이하게 하였다. 해수 필터 내부의 염화은/실리카 분말 혼합물의 부피비는 1:6이며, 유동전위(streaming potential)에 의한 잡음을 최소화하는 역할을 한다[15]. 또한, 염화은 분말은 전극 내부의 해수에 염화 이온을 포화시켜 고정된 염화 이온 농도를 갖도록 하며, 은-염화는 막대 표면에서 염화은이 해수에 용해되는 것을 최소화한다[12,15]. 우레탄 몰딩은 막대와 신호선을 고정하는 역할뿐만 아니라 상부 커버 안쪽 신호선 부의 방수 역할을 한다.

개발 전극의 가장 중요한 은-염화는 막대는 3전극 셀에서 은 막대를 양극산화하여 제작하였다. 우선, 99.99% 순도의 직경

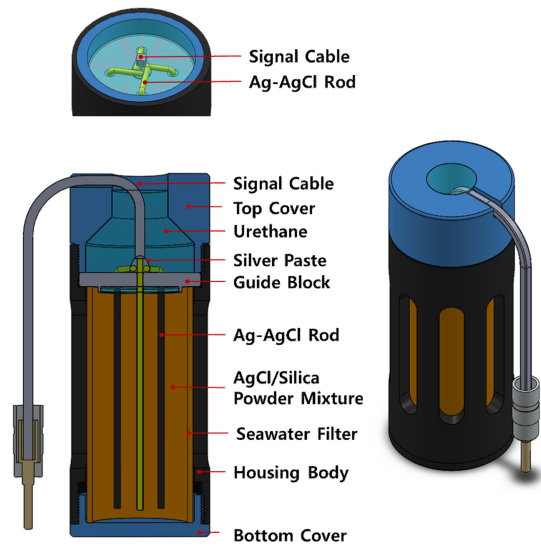


Fig. 1. Schematic of the multi-rod type Ag-AgCl electrode.

2 mm인 은 막대를 110 mm로 재단한 후 탈 이온수 (deionized water)에 세척하였다. 그 후, 3.3 M의 염화칼륨(KCl) 용액이 담긴 용기에 백금 소재의 대 전극(counter electrode), 은-염화는 기준 전극(reference electrode), 은 막대를 작업 전극(working electrode)으로 3전극 셀을 구성하였다. 인가 전압을 0.1V에서 1.25 V까지 단계적으로 증가시키며 아래 식(1)과 같이 양극산화를 통해 은 표면에 염화은을 생성하였다 [5].



양극산화를 통해 생성되는 염화은의 양은 패러데이 법칙을 이용하여 아래 식(2)와 같이 계산된다[9].

$$m_{\text{AgCl}} = \frac{QM_{\text{AgCl}}}{F} \quad (2)$$

여기서,  $m_{\text{AgCl}}$ 은 생성된 염화은 질량,  $Q$ 는 양극산화 과정에서 인가된 전류의 시간에 대한 적분 값인 전하량(C),  $M_{\text{AgCl}}$ 은 염화은의 몰 질량(g/mol),  $F$ 는 패러데이 상수(96500 C/mol)이다. 생성된  $m_{\text{AgCl}}$ 이  $Q$ 에 비례하는 관계를 이용해서 은-염화는 막대 30개를 제작한 후 각각의  $Q$ 값 평균과 표준편차 확인을 통해 제작 공정간 균일성을 확인하였다.

### 2.2 다중 막대형 은-염화는 전극 특성 분석

제작된 다중 막대형 은-염화는 전극 특성을 분석하기 위한 실험 구성을 Fig. 2에 나타내었다. 우선, 자체 제작한 소형 아크릴 시험 수조 (가로 500 mm, 세로 400 mm, 높이 300 mm)에 전기 전도도가 약 5 S/m인 인공해수를 채워 넣었다. 수조 내에 균일한 전기장을 발생시킬 수 있도록 수조 양 끝 면에는 평행 도체 판 형태로 송신 전극을 설치하였다. 2개의 제작된 수신 전극을

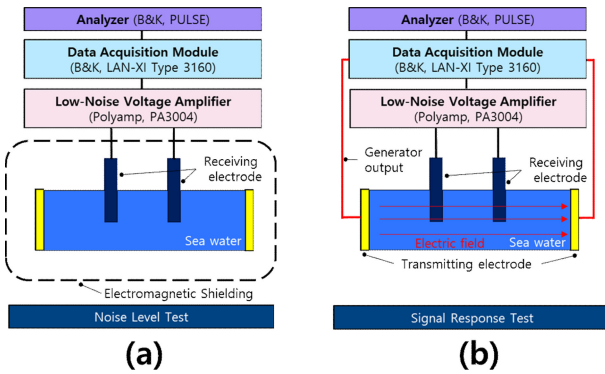


Fig. 2. Test configuration for evaluating noise level and signal response characteristics of the developed electrodes.

100 mm 간격(center to center)을 두고 수조 중앙에 위치시켜 1 축 수중 전기장 센서와 동일한 구성에서 수신 전극의 특성을 분석 하였다.

Fig. 2(a)는 수신 전극의 자체잡음준위  $N_{ELD}$ 를 측정하는 실험 구성을 나타내었다. 외부 환경에 의한 전자기 차폐를 위해 별도의 자기차폐룸 (가로 2.5 m, 세로 2.5 m, 높이 2.5 m) 내에 소형 수조를 설치하였다. 증폭기의 입력 임피던스는 10 k $\Omega$ , 저역/고역 통과 필터의 차단 주파수는 각각 5 mHz, 14 kHz이며, 증폭비는 86 dB로 설정하였다. 그리고 수신 전극을 24시간 이상 해수에 충분히 침지 시킨 후  $N_{ELD}$  측정 실험을 실시하였다.  $N_{ELD}$  측정 전에 증폭기 입력단을 단락(short)시킨 후 증폭기의 자체잡음준위  $N_{AMP}$ 를 측정하여  $N_{ELD}$ 와 비교하였다. 수중 전기장 센서 전극의 잡음준위는 일반적으로 1Hz에서 잡음준위로 평가된다 [12-14].

자체잡음 분석을 위해 증폭기 출력신호  $V_g$ 를 증폭비  $G$ 로 나눈 수신 전극의 전위차 신호  $\Delta V$ 에 대해 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, 이하 FFT)을 수행했다. FFT 조건을 window hanning, span 1.563Hz, line 800, overlap 66.67%, average 50으로 설정하고, 실효스펙트럼 밀도 (Root Mean Square Spectral Density, 이하 RMS SD)값을 분석하였다.

Fig. 2(b)는 수신 전극의 송신 전기장 신호에 대한 응답 특성을 측정하는 실험 구성을 나타내었다. 증폭기 설정은 증폭비를 66dB로 변경한 것을 제외하고 전극 잡음 측정 시 사용한 설정 값과 동일하다. 신호수집모듈의 출력 채널을 송신 전극에 연결하여 수조 내 해수에 사인 파형 송신 전기장 신호  $E_t$ 를 발생시켰고 그 크기는 다음 식 (3)과 같이 계산된다.

$$E_t = \frac{V_{sh}}{\sigma_e AR_{sh}} \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_e$ 는 해수 전기전도도(electrical conductivity),  $A$ 는 송신 전극 면적,  $R_{sh}$ 는 출력 채널과 송신 전극 사이에 연결된 셉트저항(100  $\Omega$ ),  $V_{sh}$ 는 셉트저항 양단의 전압이다.

수신 전기장 신호  $E_r$ 은  $V_g$ ,  $G$ , 수신 전극 간 거리  $l$ 을 이용해

다음 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$E_r = \frac{\Delta V}{l} = \frac{V_g}{lG} \quad (3)$$

$E_t$ 와  $E_r$  사이의 오차  $\epsilon$ 을 다음 식 (4)와 같이 계산해서 제작된 전극의 수신 정확도를 평가하였다.

$$\epsilon = \left| \frac{E_t - E_r}{E_t} \right| \times 100 \quad (4)$$

$E_t$ 와  $E_r$ 은 주파수 역 분석 결과에서 계산된  $E_t$  송신 주파수에서의 실효값(Root Mean Square, 이하 RMS)이다. FFT 조건은 window hanning, overlap 66.67%, average 20이고 송신 주파수가 1 Hz일 때는 span 10 Hz, line 400, 송신 주파수가 10~1000Hz 인 경우에는 span 1600 Hz, line 6400으로 설정했다.

제작된 전극의 전기장 신호 수신에 대한 동작 범위를 확인하기 위해 송신 주파수를 1Hz로 고정 한 후,  $E_t$ 를 1 ~ 10000  $\mu V/m$  (80dB)범위에서 변화시키며  $\epsilon$ 값의 변화를 확인했다. 이 때,  $E_t$ 와  $E_r$ 의 고조파 왜곡 (Total Harmonic Distortion, 이하 THD)을 다음 식(5)와 같이 계산하여 비선형 특성을 분석하였다[16].

$$THD = 20 \times \log_{10} \left( \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{10} E_n^2}}{E_1} \right) \quad (5)$$

여기서,  $E_1$ 은  $E_t$  송신주파수에서 전기장 신호 값이고,  $E_n$ 은 고조파(harmonics) 전기장 신호 값이다.

그리고,  $E_t$ 의 크기를 10000  $\mu V/m$ 로 고정 한 후, 송신 주파수를 1~1000Hz 범위에서 변화시키며  $\epsilon$ 값의 변화를 분석하여 제작된 전극의 전기장 신호 수신에 대한 주파수 응답 특성을 확인하였다.

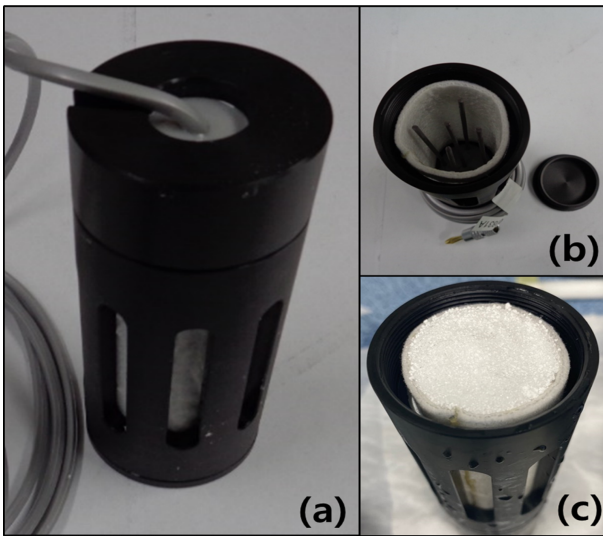
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 다중 막대형 은-염화은 전극 제작 결과

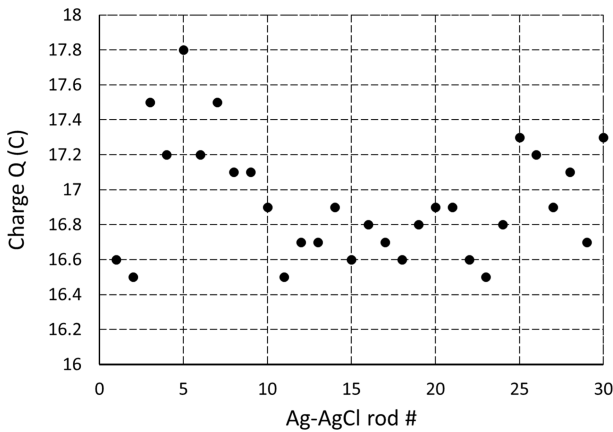
개발된 다중 막대형 은-염화은 전극 사진을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 조립 완성품 상태의 전극 사진이고, Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)는 각각 염화은/실리카 분말을 채워 넣기 전/후의 사진이다.

은 막대 30개를 각각 양극 산화하여 은-염화은 막대로 제작할 때 은 막대 표면으로 전달된 전하량  $Q$ 를 Fig. 4에 나타내었다. 평균값은 약 16.96 C 이고 표준편차는 약 0.33 C이다. 평균 값 대비 표준편차의 비율이 약 2% 이내 수준으로 제작 공정간 균일성을 확인하였다. 양극 산화 전 은 막대의 전처리 공정, 전해질 온도, 농도 등 양극 산화 조건을 정밀하게 제어한다면 공정간 균일성을 더 높일 수 있을 것으로 판단된다.





**Fig. 3.** Photograph of the developed multi-rod type Ag-AgCl electrode; (a) the assembled electrode, (b) five Ag-AgCl rods fixed on the guide block and (c) AgCl/Silica powder mixture filled in the seawater filter.

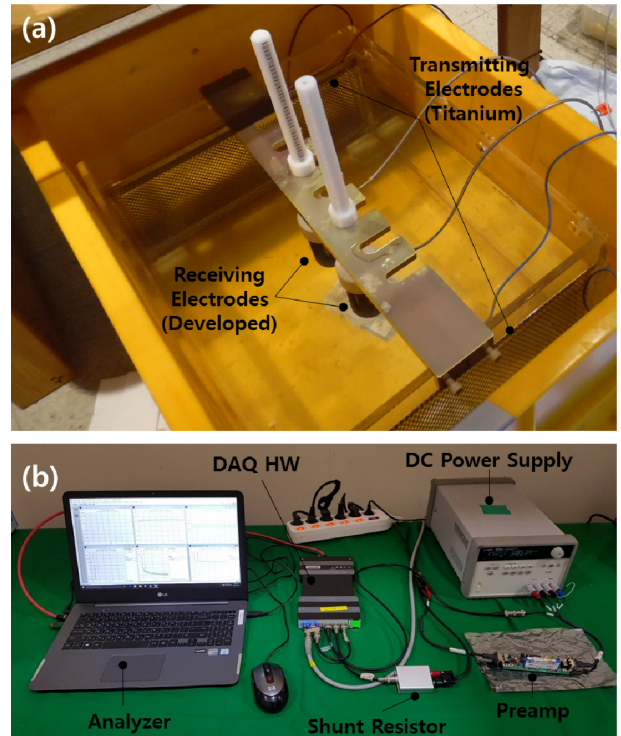


**Fig. 4.** The charge passed on the surface of Ag rod in each Ag-AgCl rod fabricating process.

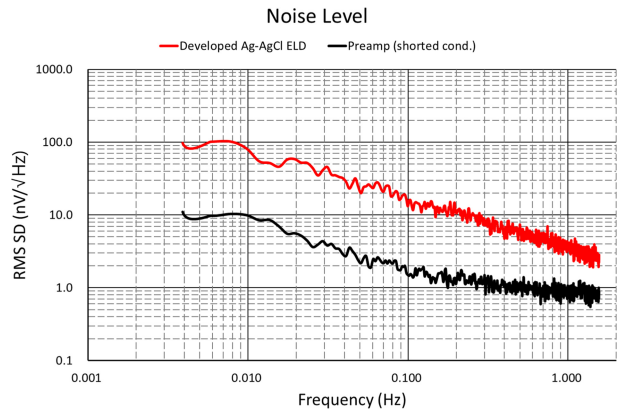
### 3.2 다중 막대형 은-염화은 전극 특성 분석 결과

다중 막대형 은-염화은 전극 특성 분석을 위한 실험 구성 사진을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)와 같이 자기 차폐룸 내에 설치된 소형 아크릴 시험 수조 위의 거치대에서 100 mm 간격을 두고 제작된 전극을 해수 내에 위치시켰다. Fig. 5(b)는 자기 차폐룸 밖에 설치된 증폭기 전원 인가용 DC 전원 공급기, 증폭기, 섀트저항, 데이터 수집 모듈, 신호 분석기를 나타낸 사진이다.

제작된 전극과 증폭기의 자체잡음준위를 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다.  $NL_{AMP}$ 가  $NL_{ELD}$ 의 30% 이하로 낮게 측정됨으로  $NL_{ELD}$ 를 측정하기에 증폭기의 성능은 충분하다고 판단된다. 1 Hz에서  $NL_{ELD}$ 는 약  $3.7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이다. 일반적으로 심해환경에



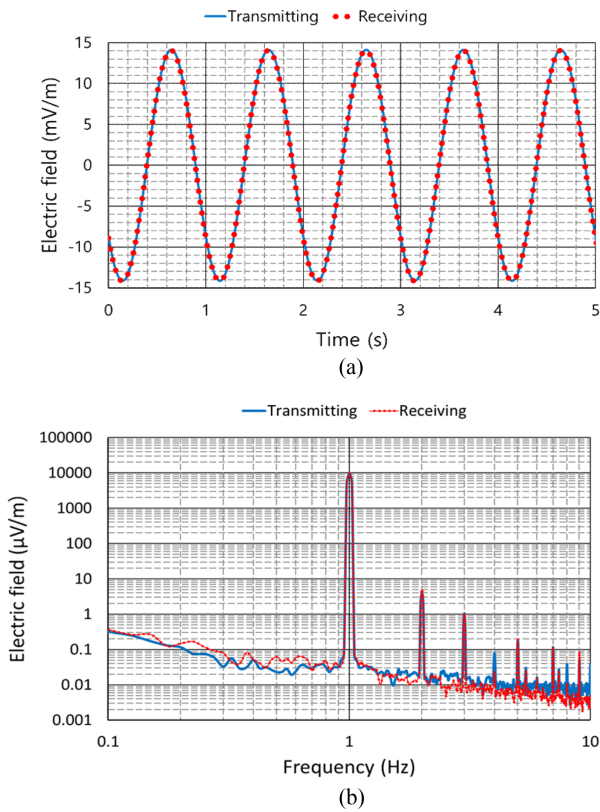
**Fig. 5.** Photograph of the test set-up; (a) the two developed electrodes placed in the center of acrylic tank filled with artificial seawater inside magnetic shielding room (b) electric signal measurement and analysis system.



**Fig. 6.** Noise level graph in the frequency domain.

서 자원탐사용으로 사용되고 있는 은-염화은 전극의  $NL_{ELD}$ 는 약  $0.75\sim 1.8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 Hz 수준으로 본 연구를 통해 개발된 전극의  $NL_{ELD}$ 보다 낮다[12-14].

그러나 천해 환경에서 수중 기동 표적 탐지를 목적으로 개발된 수중 전기장센서용 전극의  $NL_{ELD}$ 로는 충분히 만족할 만한 수준으로 판단된다. 아울러 전극 형상의 제약사항이 적은 해저 자원 탐사분야에서의 전극 개발 시에는 은-염화은 막대의 크기 및 개수를 조절을 통해 요구되는 수준의  $NL_{ELD}$ 를 충분히 달성할 수 있을 것으로 판단된다.



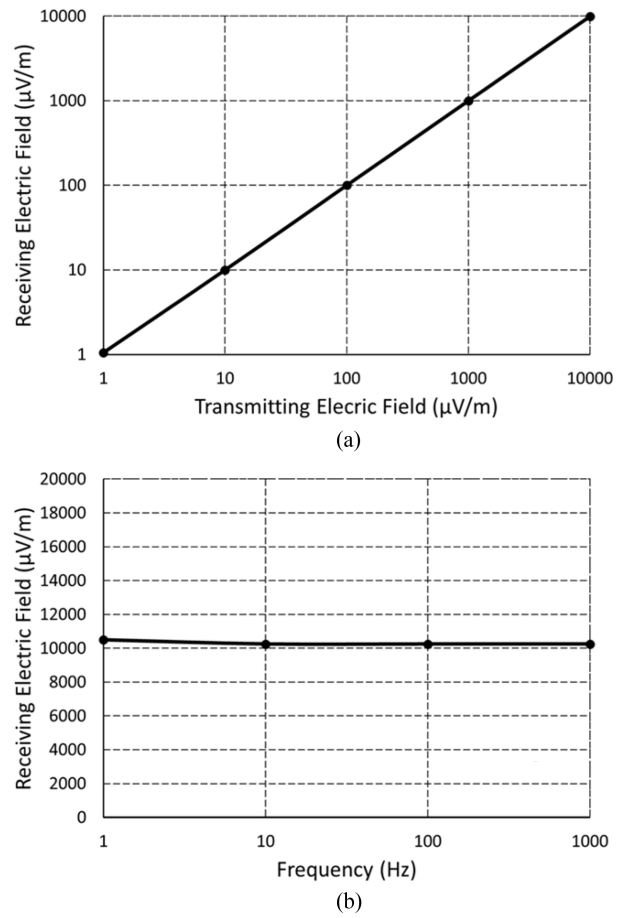
**Fig. 7.** Comparison of transmitting and receiving electric field at 1Hz and 10000  $\mu\text{V/m}$ ; (a) time domain analysis results and (b) frequency domain analysis results.

수조 내에서  $E_t$ 가 10000  $\mu\text{V/m}$  @ 1Hz가 되도록 신호수집모듈의 출력 채널 값을 설정하여  $E_t$ 와  $E_r$ 을 측정해서 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)에 나타낸 것과 같이 시간역에서  $E_t$ 와  $E_r$ 은 크기와 위상 차이가 거의 없이 일치한다. 또한, 1 Hz에서  $E_t$ 와  $E_r$  값이 0.1% 이내의 오차범위로 동일한 것을 Fig. 7(b)에서 확인할 수 있다.

수조 내에서  $E_t$ 가 10000  $\mu\text{V/m}$  @ 1 Hz가 되도록 신호수집모듈의 출력 채널 값을 설정하여  $E_t$ 와  $E_r$ 을 측정해서 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)에 나타낸 것과 같이 시간역에서  $E_t$ 와  $E_r$ 은 크기와 위상 차이가 거의 없이 일치한다. 또한, 1 Hz에서  $E_t$ 와  $E_r$  값이 0.1% 이내의 오차범위로 동일한 것을 Fig. 7(b)에서 확인할 수 있다.

개발 전극의 전기장 신호 수신에 대한 동적 범위와 주파수 응답 결과는 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8 (a)에 나타낸 것처럼 전기장 신호 크기가 1~10000  $\mu\text{V/m}$  @ 1Hz범위에서  $E_t$ 와  $E_r$ 은 선형적이다. 여기서,  $E_t$ 와  $E_r$ 의 주파수역 결과로부터 THD를 계산한 결과를 Table 1에 나타내었는데, -36 dB 이하의 값으로  $E_t$  생성 시스템과  $E_r$  측정 시스템이 모두 선형적이라고 판단할 수 있다.  $E_t$ 에 비해  $E_r$ 이 상대적으로 THD가 더 커짐을 볼 수 있는데, 이는  $E_t$ 에 비해  $E_r$ 이 고주파수 대역에서 잡음준위가 높기 때문이다.

또한, 전기장 신호의 크기가 가장 작은 1  $\mu\text{V/m}$ 에서 THD가



**Fig. 8.** Electric field signal response results of developed electrodes; (a) dynamic range and (b) frequency response.

**Table 1.** THD results on  $E_t$  and  $E_r$  in the range of 1-10000  $\mu\text{V/m}$  @ 1Hz.

$E@1\text{Hz}$ ( $\mu\text{V/m}$ )	THD on $E_t$ (dB)	THD on $E_r$ (dB)
1	-56	-36
10	-73	-54
100	-94	-74
1000	-87	-82
10000	-67	-66

가장 크을 알 수 있으며, 이는 전기장 신호 크기가 감소함에 따라 고주파수 대역에서의 잡음 수준은 유사하나 송신 주파수에서의 전기장 크기가 감소하기 때문이다.

Fig. 8 (a)의 결과에서  $E_t$ 와  $E_r$  사이의 오차  $\epsilon$ 을 계산하여 Table 2에 나타내었다. 1~10000  $\mu\text{V/m}$ @ 1 Hz 범위에서  $\epsilon$ 은 최대 0.6%이다. 이와 같은 결과로부터 개발된 전극의 전기장 신호에 대한 동적 범위는 80 dB 이상인 것으로 확인했다.

주파수가 1~1000Hz @ 10000  $\mu\text{V/m}$ 범위에서  $E_r$  크기는 Fig. 8(b)에 나타낸 것처럼 큰 변화가 없다.  $\epsilon$ 도 Table 3에 나타낸 것처럼 최대값이 1.1%이다. 따라서, 개발된 전극은 1~1000Hz 범

**Table 2.** Errors between  $E_i$  and  $E_r$  in the dynamic range test results.

$E@1\text{Hz}$ ( $\mu\text{V}/\text{m}$ )	$\varepsilon$ (%)
1	0.6
10	0.1
100	0.2
1000	0.2
10000	0.1

**Table 3.** Errors between  $E_i$  and  $E_r$  in the frequency response test results.

Freq. (Hz)	$\varepsilon$ (%)
1	0.1
10	0.4
100	0.9
1000	1.1

위에서 주파수 응답 특성이 약 1%의 오차 범위 내에서 평탄한 것으로 확인하였다.

#### 4. 결 론

5개의 은-염화은 막대를 적용한 수중 전기장 센서용 다중 막대형 은-염화은 전극을 제작하고 그 특성을 분석하였다. 개발된 전극의 자체잡음준위는 약  $3.7\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1Hz이며, 전기장 신호 수신에 대한 동적 범위는 80dB @ 1Hz 이상이고,  $1\sim 10000\mu\text{V}/\text{m}$  @ 1Hz 범위에서 오차는 약 0.6% 이내 수준임을 확인하였다. 또한 주파수 응답 특성은  $1\sim 1000\text{Hz}$  @  $10000\mu\text{V}/\text{m}$  범위에서 약 1.1% 오차 범위 내에서 평탄하였다. 본 연구를 통해 개발된 전극은 수중 전기장 센서에 직접 활용 가능할 것으로 판단되며, '22년 5월로 예정된 실 해상시험을 통해 개발 전극의 성능을 추가 검증할 계획이다. 향후 은-염화은 막대 개수 증가와 양극산화 공정 개선이 이루어진다면 보다 우수한 성능의 전극 개발도 가능할 것으로 기대한다.

#### 감사의 글

본 연구는 국방과학연구소가 수행하는 “50 nV급 수중 전기장 센서 설계 기술”과제의 일환으로 진행되었습니다 [사업부호: 912741201].

#### REFERENCES

[1] R. Mackie, M. D. Watts, and W. Rodi. “Joint 3D inversion of marine CSEM and MT data”, *SEG Tech. Program*

- Expanded Abstr.* 2007, pp. 574-578, 2007.
- [2] X. Wang, D. Liu, W. Zhu, and D. Ji, “Underwater target detection based on electric-field sensor line array”, *Appl. Mech. Mater.*, Vol. 713-715, pp. 337-342, 2015.
- [3] G. Petiau and A. Dupis, “Noise, temperature coefficient, and long time stability of electrodes for telluric observations”, *Geophys. Prospect.*, Vol. 28, No. 5, pp. 792-804, 1980.
- [4] B. Rostami, S. I. Mirzaei, A. Zamani, A. Simchi, and M. Fardmanesh, “Development of an enhanced porosity Ag/AgCl reference electrode with improved stability”, *Eng. Res. Express*, Vol. 1, No. 1, pp. 015039(1)-015039(9), 2019.
- [5] Y. H. Heo, W. I. Park, J. S. Whang, and C. O. Park, “Fabrication and Evaluation of Ag/AgCl Reference Electrode”, *Elec. Mater. Lett.*, Vol. 3, No. 1, pp. 33-38, 2007.
- [6] A. Albulbul, “Evaluating Major Electrode Types for Idle Biological Signal Measurements for Modern Medical Technology”, *Bioeng.*, Vol. 3, No. 3, pp. 20(1)- 20(10), 2016.
- [7] I. S. Jeong, J. C. Jung, and T. J. Kim, “A Study on the Apparatus for Measuring Oxygen-Permeability of Membranes with a Multi-Electrode Oxygen Sensor”, *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 21, No. 3, pp.229-234, 2012.
- [8] S. Kim, G. Park, H. J. Ahn, B. U. Yoo, I. H. Song, K. H. Lee, K. H. Kim, J. H. Lim, and J. Y. Lee, “Facial Fabrication and Characterization of Novel Ag/AgCl Chloride Ion Sensor Based on Gel-Type Electrolyte”, *Front. Chem.*, Vol. 8, pp. 574986(1)-574986(13), 2020.
- [9] H. Ha and J. Payer, “The effect of silver chloride formation on the kinetics of silver dissolution in chloride solution”, *Electrochim. Acta*, Vol. 56, No. 7, pp. 2781-2791, 2011.
- [10] S. M. Heintzelman and D. M. Hull, “Characterization and Analysis of Electric-field Sensors”, *Proc. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet.*, pp. 1-8, 2015.
- [11] E. Huigen, A. Peper, and C. A. Grimbergen, “Investigation into the origin of the noise of surface electrodes”, *Med. Biol. Eng. Comput.*, Vol. 40, No. 3, pp. 332-338, 2002.
- [12] Wang Z, Deng M, Chen K, Wang M, Zhang Q, and Zeng D, “Development and evaluation of an ultralow-noise sensor system for marine electric field measurements”, *Sensor Actuat A: Phys*, Vol. 213, pp. 70-78, 2014.
- [13] J. Zai, Y. Fu, X. Zai, H. Ji, A. Liu, and F. Chai, “Fabrication of novel ag/agcl electrode pair on the template of carbon foam as marine electric field sensor and its electrochemical performances”, *Ionics*, Vol. 23, No. 8, pp. 2213-2219, 2017.
- [14] W. Luo, H. Dong, J. Xu, J. Ge, H. Liu, and C. Zhang, “Development and characterization of high-stability all-solid-state porous electrodes for marine electric field sensors”, *Sens. Actuators A: Phys*, Vol. 301, pp. 111730(1)-111730(12), 2020.
- [15] S. C. Webb, S. C. Constable, C. S. Cox, and T. K. Deaton, “A seafloor electric field instrument”, *J. Geomagn. Geoelectr.*, Vol. 37, No. 12, pp. 1115-1129, 1985.
- [16] D. Shmilovitz, “On the Definition of Total Harmonic Distortion and Its Effect on Measurement Interpretation”, *IEEE T. Power Deliver.*, Vol. 20, No. 1, pp. 526-528, 2005.