

# 초파 연산증폭기와 다수의 정합 트랜지스터를 이용한 수중 전기장 센서용 저잡음 전치 증폭기 설계

배기웅<sup>1</sup> · 양창섭<sup>1</sup> · 한승환<sup>2</sup> · 정상명<sup>3</sup> · 정현주<sup>1,+</sup>

## Low-Noise Preamplicifier Design for Underwater Electric Field Sensors using Chopper stabilized Operational Amplifiers and Multiple Matched Transistors

Ki-Woong Bae<sup>1</sup>, Chang-Seob Yang<sup>1</sup>, Seung-Hwan Han<sup>2</sup>, Sang-Myung Jeoung<sup>3</sup>, and Hyun-Ju Chung<sup>1,+</sup>

### Abstract

With advancements in underwater stealth technology for naval vessels, new sensor configurations for detecting targets have been attracting increased attention. Latest underwater mines adopt multiple sensor configurations that include electric field sensors to detect targets and to help acquire accurate ignition time. An underwater electric field sensor consists of a pair of electrodes, signal processing unit, and preamplifier. For detecting underwater electric fields, the preamplifier requires low-noise amplification at ultra-low frequency bands. In this paper, the specific requirements for low-noise preamplifiers are discussed along with the experimental results of various setups of matched transistors and chopper stabilized operational amplifiers. The results showed that noise characteristics at ultra-low frequency bands were affected significantly by the voltage noise density of the chopper amplifier and the number of matched transistors used for differential amplification. The fabricated preamplifier was operated within normal design parameters, which was verified by testing its gain, phase, and linearity.

**Keywords:** Underwater electric field sensors, Preamplifier, Chopper amplifier, Low-noise amplifier, Low-frequency amplifier

### 1. 서 론

이종 금속이 전기적으로 연결된 상태에서 전해질에 노출되면 두 금속 간에 전위차가 발생하며, 상대적으로 전위가 낮은 금속 표면에서 갈바닉 부식을 야기한다. 이종 금속간 부식 원리는 해수 환경에서 운용되는 함정에도 동일하게 적용된다. 선체 금속과 프로펠러 금속 간에 전위차가 발생하여 부식이 일어나고, 전해질인 해수를 통해 전류 경로가 형성되어 정 전기장(static electric field)이 수중으로 방사된다. 더욱이, 프로펠러의 회전에 의해 발

생되는 축계 전기 저항의 주기적 변화는 부식 전기장 신호의 변조를 야기하여 교류 전기장(alternating electric field) 신호를 생성한다. 이러한 함정 전기장 신호는 수중 전기장 센서를 이용한 함정 탐지 수단으로 활용되고 있다.

함정 발생 전기장 신호를 탐지하기 위해, 군사 강대국들은 이미 1970년대부터 수중 전기장 센서 개발에 착수하여 현재까지 지속적으로 기술을 발전시켜 오고 있다[1,2]. 국내에서는 2013년~2019년까지 한국지질자원연구원에서 해저 이상체 탐지를 목적으로 탄소섬유형 전기장센서를 개발한 사례가 있다[3,4].

일반적으로, 수중 전기장 센서는 해수에 노출되어 전기장 신호를 감지하는 전극, 감지된 미약한 전기장 신호를 증폭하는 전치증폭기, 증폭된 신호를 처리하는 신호처리기로 구성된다[5-8]. 전치증폭기는 수중에서 저속으로 이동하는 표적의 부식 또는 방식 전류에 의한 미약한 전기장 신호를 탐지해야 하므로, 저주파 대역(수~수십mHz)에서 우수한 증폭 잡음 특성이 요구된다. 하지만 일반적인 증폭기에 사용되는 반도체 소자는 저주파 대역에서 플리커 잡음, 드리프트 잡음, 오프셋 잡음 등이 발생하므로 1 Hz 이하의 주파수 대역에서 잡음을 낮추는 데에 한계가 있다. 본 논문에서는 초파 연산증폭기와 다수의 정합 트랜지스터를 사용하여 1 Hz 이하의 주파수 대역에서 신호 증폭기의 자체 잡음을 저감시킬 수 있는 수중 전기장센서용 전치증폭기 설계

<sup>1</sup> 국방과학연구소 해양기술연구원(Agency for Defence Development, Maritime Technology Research Institute)  
P.O. Box 18, Changwon, Gyeongnam, 51678, Korea.

<sup>2</sup>LIG 넥스원 해양 2 연구소 (LIG Nex1)  
333, Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-city, Gyeonggi-do, 13488, Korea.

<sup>3</sup> 에이더블 테크놀로지 하드웨어개발팀 (Advanced Wave Technology)  
14556, Sambo Technotower, 2615-2616 ho, Jomaru-ro 385 beon-gil, Bucheon-si, Gyeonggi-do, Korea.

<sup>+</sup>Corresponding author: hjchung75@add.re.kr  
(Received: Mar. 14, 2022, Revised: Mar. 28, 2022, Accepted: Mar. 29, 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.

및 성능 시험 결과에 대해 기술한다.

## 2. 전치증폭기 요구조건 및 설계

증폭기의 자체 잡음은 아래 수식 (1)과 같이 전치증폭기 입력단에 의해 크게 좌우된다[9].

$$F_{total} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_2} + \dots, \quad (1)$$

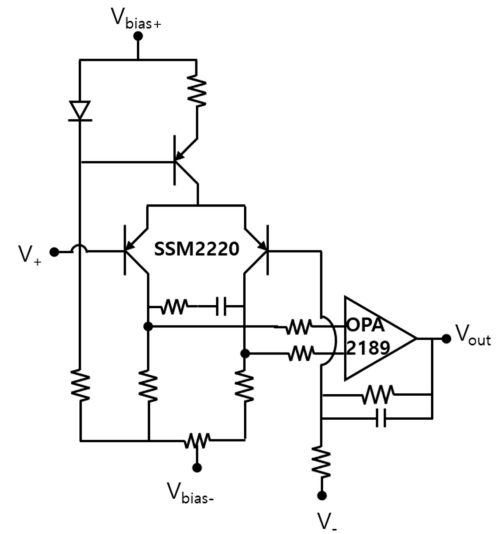
여기서  $F_{total}$ 은 전치증폭기 전체 잡음 지수,  $F_N$ 은 N번째 단의 잡음 지수,  $G_N$ 은 N번째 단의 이득을 의미한다. 입력단의 잡음 지수( $F_1$ )가 낮은 동시에 이득( $G_1$ )이 높을수록 증폭기의 전체 잡음이 낮아진다. 두번째 단의 잡음 지수( $F_2$ )는 첫번째 단의 이득으로 나누어지므로, 두번째 단의 이득을 크게 설계하면 두번째 단의 잡음이 전체 잡음에 주는 영향을 크게 감소시킬 수 있다.

수중 전기장센서용 전치증폭기는 두 입력 전극에서 입력되는 신호의 차를 증폭해야 하므로 차동 증폭단 구성으로 설계하는 것이 바람직하다. 차동 증폭단을 구현하는 방법은 여러 방법이 있다. 계측 증폭기 소자를 이용한 차동 증폭단 구성은 계측 증폭기 소자의 저주파 잡음 성능에 의해 전치증폭기의 저주파 잡음 성능이 결정되므로, 잡음 감소를 위한 추가적인 설계가 힘들다. Analog Device 사의 상용 계측 증폭기 소자인 AD8428은 소자끼리 병렬 연결을 통해 잡음을 감소시킬 수 있지만, 플리커 잡음의 코너 주파수가 1 Hz 정도로 다소 높은 경향이 있어, 수십 mHz의 저주파에서 저잡음 동작이 요구되는 수중 전기장 센서에 적용하기에 다소 미흡하다고 판단된다.[10]

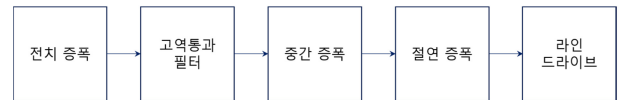
본 논문에서는 저잡음 고이득 차동증폭단 구현을 위해, 저잡음 정합 트랜지스터로 구성된 차동증폭단을 설계하였다. 정합 트랜지스터는 두 트랜지스터의 전류 증폭비를 수 % 이내 오차로 정합한 트랜지스터 1쌍으로 구성되며, 저잡음 특성으로 인해 기존부터 차동증폭단의 입력단으로 자주 사용되는 소자이다. 본 연구에서는 저주파에서 저잡음 특성이 우수한 SSM2220 정합 트랜지스터를 사용하였다.

차동증폭단에서 증폭된 전류 및 전압 신호는 직후 위치한 비반전 되먹임 구성 연산증폭기의 입력으로 연결된다. 정합 트랜지스터 입력단은 낮은 증폭 이득에서는 잡음 특성이 우수하지만, 높은 증폭 이득을 위해서는 잡음이 높아지는 특성이 있다. 따라서 정합 트랜지스터를 이용한 입력단에서는 낮은 증폭 이득과 낮은 입력 잡음의 특성을 살리고, 직후 연결되는 연산증폭기를 이용하여 충분한 이득을 확보하는 구조로 설계하는 것이 저주파 잡음과 증폭 이득 측면에서 유리하다. 여기서 연산증폭기의 잡음 특성이 전치증폭기 전체의 잡음 특성에 미치는 영향을 본 논문의 4장에서 실험을 통해 확인하였다.

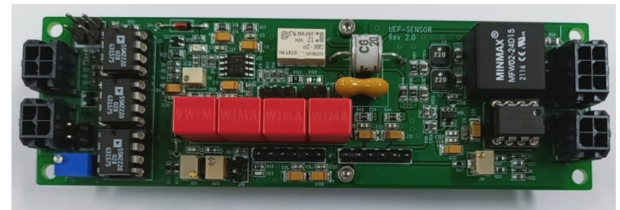
전치증폭단을 통과하며 증폭된 신호는 뒤이어 고역통과필터, 절연증폭기, 라인 드라이브 증폭기를 통과하며 추가 이득을 확보



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. (a) Circuit of designed preamplifier(input stage), (b) Block diagram of preamplifier, (c) Fabricated preamplifier.

하는 구조로 전치증폭기 회로를 설계하였다. 전치증폭기의 동작 주파수 대역은 10 mHz ~ 1 kHz에서 이득 특성이 평탄하도록 설계하였다. 고역통과필터의 차단 주파수는 5 mHz로 설계하였고, 저역통과필터의 차단 주파수는 14 kHz로 설계하였다. 전치증폭기 이득은 66 dB, 86 dB를 선택할 수 있게 설계하였다. 위에서 설명한 전치증폭기 입력단 회로를 Fig. 1(a)에, 전치증폭기 전체 블럭도와 제작된 증폭기 사진을 각각 Fig. 1(b)와 1(c)에 나타내었다.

## 3. 실험 구성

제작된 전기장센서용 저잡음 전치증폭기의 이득, 자체 잡음 등 여러 성능 지표에 대해 전자기 차폐실 내에서 측정 실험을 수행하였다. 전자기 차폐실은 1 Hz 이하 저주파 대역에서 외부 전자기 잡음을 80 dB 이상 차폐할 수 있는 시설로서, 외부 잡음

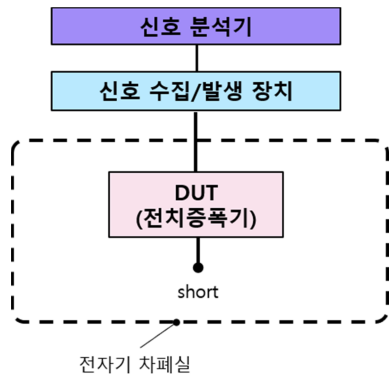


Fig. 2. Experimental setup inside the electromagnetic shield room for noise measurement

영향을 배제한 상태로 전치증폭기의 자체 잡음을 정밀 측정하기에 적합하다.

Fig. 2는 실험 구성을 나타낸다. 차폐실 내에서 발생하는 잡음을 최소화 하기 위해, 신호 분석기와 신호 수집/발생기는 차폐실 외부에 위치시켰고, 전자기 차폐실 내에는 전치증폭기만 위치시켰다. 차폐실 내외는 직경 8 cm의 개구를 통해 전원 및 신호 케이블로 연결하였다. 신호 발생, 수집, 분석에 사용된 데이터 획득 장비는 24bit analog to digital 분해능을 가지는 Bruel & Kjaer 사의 LAN-XI Type 3160를 사용하였다. 해당 장비는 낮은 입력 잡음을 가지고 있어 저잡음 전치증폭기의 자체 잡음 시험을 수행하기에 적합하다.

자체 잡음 시험 외에도, 출력 범위 및 선형도 시험, 주파수에 따른 이득 및 위상 응답특성 시험을 수행하였다. 각각의 시험 결과를 통해 설계된 전치증폭기가 설계 목표 범위 내에서 정상적으로 동작함을 확인할 수 있었다. 잡음 시험을 수행할 때, 전치증폭기의 이득은 86 dB로 설정하였고, 출력 범위 및 선형도 시험, 주파수에 따른 이득 및 위상 응답특성 시험 시에는 이득을 66 dB로 설정하였다.

#### 4. 실험 결과

4장에서는 전치증폭기 설계에 적용된 초퍼 연산 증폭기 적용 유무, 정합 트랜지스터 적용 유무 및 정합 트랜지스터 개수에 따른 자체잡음 특성 시험 결과를 제시하였다. 더불어 제작된 전치증폭기의 출력 범위 및 선형도 시험, 주파수에 따른 이득 및 위상 응답특성 시험을 통해 제작된 전치증폭기가 설계 범위 내에서 정상적으로 동작함을 확인하였다.

##### 4.1 초퍼 연산 증폭기 적용에 따른 잡음 성능

초퍼 연산증폭기는 입력 신호를 증폭하기 전에 저주파 입력 신호를 고주파 대역으로 변환하여 증폭하고, 증폭된 고주파 신

Table 1. Comparison of noise between preamplifiers with chopper and non-chopper operational amplifiers

Operational amplifier	10 mHz	100 mHz	1 Hz
OPA2277 (Non-chopper)	7.2 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1.9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1.0 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
OPA2189 (Chopper)	4.2 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	2.0 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$

호를 다시 저주파 신호로 변환한다.[11] 이를 통해 초퍼 연산증폭기는 저주파 대역에서 낮은 플리커 잡음, 드리프트 잡음, 오프셋 잡음을 갖는다. 본 논문에서는 비초퍼 연산증폭기와 초퍼 연산증폭기를 이용했을 경우 각각에 대해, 잡음 성능을 측정하고 비교하여 Table 1에 나타내었다. 이 실험을 수행할 때, 정합 트랜지스터는 3쌍을 적용하였다. 초퍼 및 비초퍼 연산증폭기로 Texas Instruments사의 OPA2189와 OPA2277을 각각 사용하였다.

실험 결과, 예상대로 초퍼 연산증폭기(OPA2189)를 사용한 경우가 비초퍼 연산증폭기(OPA2277)를 사용한 경우 대비 10mHz의 낮은 주파수 대역에서 자체 잡음이 약 70% 정도 감소함을 확인하였다.

##### 4.2 정합 트랜지스터 적용에 따른 잡음 성능

본 절에서는 전치증폭기의 입력단에서 정합 트랜지스터 적용 유무에 따른 자체잡음 특성을 시험하였다. 연산 증폭기는 초퍼 연산증폭기를 사용하였고, 시험 결과는 Table 2와 같다.

정합 트랜지스터가 적용된 경우에는 플리커 잡음, 드리프트 잡음, 오프셋 잡음 등의 영향으로 저주파에서 잡음이 크고 고주파에서 잡음이 작은 경향을 보인다. 한편, 정합 트랜지스터를 제거한 경우에는 저주파에서 고주파까지 비교적 높고 평탄한 잡음 특성을 보인다. 그 이유는 정합 트랜지스터 적용 시에는 입력단에서 발생하는 저주파 잡음이 큰 반면, 정합 트랜지스터를 제거하면 플리커, 드리프트, 오프셋 등 잡음이 사라지고, 초퍼 증폭기의 특성인 평탄한 잡음이 10 mHz를 포함한 저주파수 대역에서 나타나기 때문이다.

본 절에서 정합 트랜지스터를 사용하지 않고 초퍼 연산증폭기만 사용하여 제작된 전치증폭기의 자체잡음은 10mHz~ 1Hz의 주파수 대역에서 8.0nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  수준으로 OPA2189 데이터시트에서 제공하는 잡음 수준 5.4nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 보다 약 2.6nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  만

Table 2. Comparison of noise between preamplifiers with and without matched transistor pair

Matched TR	10 mHz	100 mHz	1 Hz
Applied	10 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1.9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Not applied	8.3 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	7.8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	8.0 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$

**Table 3.** Comparison of noise with different number of matched transistor pairs

Matched TR	10 mHz	100 mHz	1 Hz
1 pair	10nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1.9nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.9nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
2 pairs	6.7nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1.6nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.9nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
3 pairs	5.3nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1.2nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.8nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
4 pairs	3.7nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1.0nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.7nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$

크 높다. 이는 OPA2189 뒤에 연결된 고역통과 필터와 절연증폭기 등에서 유입된 잡음의 영향으로 판단된다.

### 4.3 정합 트랜지스터 개수에 따른 잡음 성능 실험

2장에서 설명한 바와 같이, 전기장 신호 차동 증폭을 위해 전치증폭기 입력단에 정합 트랜지스터를 이용한 차동 증폭 회로를 구성하였다. 여기서 정합 트랜지스터를 병렬 연결한다면, 컬렉터 전류를 분산함으로써 잡음을 감소시키고, 분산된 전류 경로 상의 잡음을 상쇄시키는 효과를 얻을 수 있다. 정합 트랜지스터 병렬 쌍 개수에 따른 전치증폭기의 잡음 성능을 비교하여 Table 3에 정리하였다.

시험 결과, 정합 트랜지스터 쌍의 개수가 많아질수록 잡음이 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 전류 분산 및 잡음 상쇄 효과로 인해 서로 다른 컬렉터 전류 경로 상의 잡음 파워끼리 더해져서 잡음이 서로 상쇄되기 때문이다. 구체적으로, 3개의 정합 트랜지스터를 병렬 연결한 경우를 예로 들면, 잡음 전압이  $x(V)$ 라고 할 때, 정합 트랜지스터 3개 병렬 연결을 통해 3개의 전류 경로가 생성되며, 각각의 전류 경로에서 컬렉터 전류가 1/3로 감소하여 잡음 전압이 약  $x/3(V)$  생성된다. 잡음은 파워로 더해지므로, 각각의 파워를 더하면 잡음 전압은

$$\sqrt{\left(\frac{x}{3}\right)^2 + \left(\frac{x}{3}\right)^2 + \left(\frac{x}{3}\right)^2} = \frac{x}{\sqrt{3}}$$

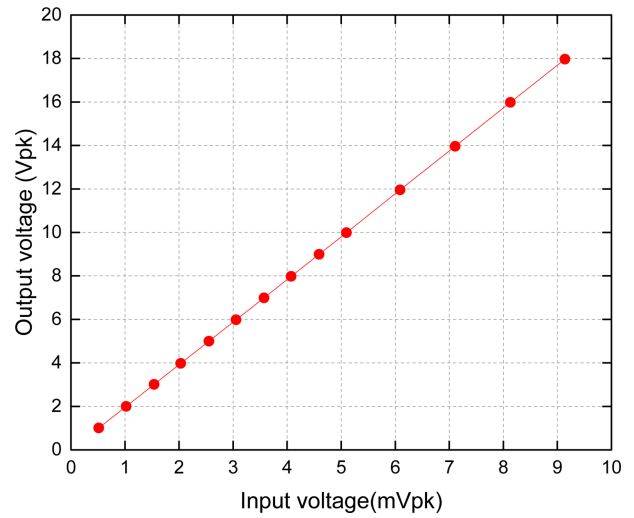
이 되어, 잡음이  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 로 감소하는 것을

확인할 수 있다. 따라서 전치증폭기의 잡음은 수식 (2)와 같이 정합 트랜지스터 쌍의 개수의 제곱근에 비례하는 경향을 보인다. 여기서  $N$ 은 정합 트랜지스터 쌍의 개수이다.

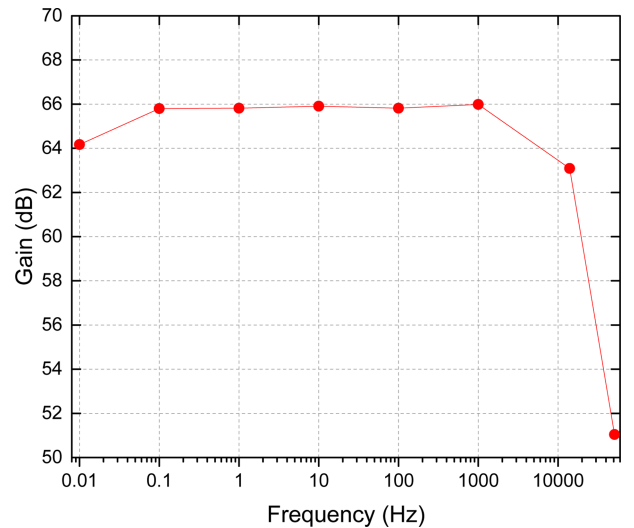
$$\text{self noise} \propto \frac{1}{\sqrt{N}} \tag{2}$$

### 4.4 출력 범위 및 선형도 시험

제작된 전치증폭기의 출력 범위 및 선형도 시험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 입력 신호의 전압은 0.5mV ~ 10 mV, 주파수는 1 Hz에서 출력 전압을 측정하였다. 시험 결과 이득은 66 dB $\pm$ 0.1 dB임을 확인할 수 있었다. 시험 결과로부터 계산된 선형도는 0.036% 수준으로, 우수한 선형도를 가짐을 확인할 수 있었다.



**Fig. 3.** Input and output characteristic of fabricated preamplifier



**Fig. 4.** Measured gain of fabricated preamplifier

### 4.5 주파수에 따른 이득 응답 특성

제작된 전치증폭기의 주파수에 따른 이득 응답 측정 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이득은 66 dB로 설정하였다. 고역통과 필터의 차단 주파수는 5 mHz, 저역통과 필터의 차단 주파수는 14 kHz가 되도록 설계/제작하였다. 시험결과 동작 대역 (10 mHz~1 kHz)에서 이득 특성이 66 dB $\pm$ 0.1 dB로 대체로 균일하며, 차단주파수 5mHz인 고역통과필터의 영향을 받아 10 mHz에서 이득이 약 2 dB 감소한 것을 확인할 수 있다.

### 4.6 주파수에 따른 위상 응답 특성

증폭기의 위상 응답 특성은 파형의 왜곡 정도를 결정하는 요소이다. 제작된 전치증폭기의 위상 응답 측정 결과를 Fig. 5에



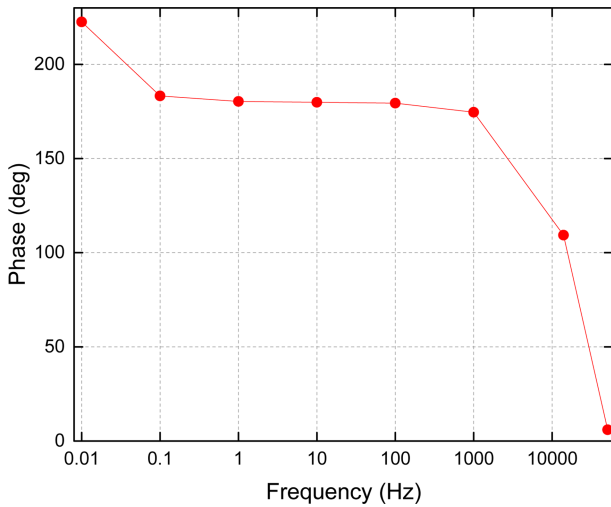


Fig. 5. Measured phase of fabricated preamplifier

나타내었다. 설계한 동작 대역에서 균일한 위상 응답을 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한 동작 대역을 벗어나면 고역 및 저역 통과 필터의 영향으로 위상이 급격히 변하는 것을 확인할 수 있다. 10 mHz에서 관측되는 다소 급격한 위상 변화는 5 mHz의 차단주파수를 갖는 고역통과필터의 영향이다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 1 Hz 이하의 주파수 대역에서 신호 증폭기의 자체 잡음을 저감시킬 수 있는 수중 전기장센서용 전치증폭기 설계 및 성능 시험 결과에 대해 기술하였다. 초퍼 연산증폭기와 4장의 정합 트랜지스터를 사용하여 제작된 전치증폭기의 자체 잡음은 1Hz에서는  $1nV/\sqrt{Hz}$  이하, 10mHz의 극 저주파수 대역에서는  $4nV/\sqrt{Hz}$  이하의 매우 낮은 잡음 특성을 보였다. 또한, 입력력범위, 주파수에 따른 이득 및 위상 응답특성시험 등을 통해 제작된 전치증폭기가 정상적으로 동작함을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 국방과학연구소가 수행하는 “50nV급 수중 전기장

센서 설계 기술” 과제의 일환으로 진행되었습니다 [사업부호: 912741201].

### REFERENCES

- [1] G. J. Webb, “Apparatus and Method for Determining Electrical Polarization of Distribution of a Vessel”, U. S. Patent, 6, 512, 356, 28 Jan, 2003.
- [2] 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 Actuators A*, Vol. 213, pp. 70-78, 2014.
- [3] 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.
- [4] J. Kim, H. Kim, K. Han, D. You, H. Heo, Y. Kwon, D. Cho, and H. Ko, “Low-Noise Chopper-Stabilized Multi-Path Operational Amplifier with Nested Miller Compensation for High-Precision Sensors”, *Appl. Sci.*, Vol. 10, No. 1, p. 281(1)-281(12), 2020.
- [5] G. B. Havsgard, H. R. Jensen, A. Kurrasch, H. Jones, P. Austin, and A. Thompson, “Low noise Ag/AgCl electric field sensor system for marine CSEM and MT applications”, *2011 Int. MARELEC conf.*, 2011.
- [6] S. Constable, “Review paper: Instrumentation for marine magnetotelluric and controlled source electromagnetic sounding”, *GeoPhy. Prosp.*, Vol. 61, pp. 505-532, 2013.
- [7] G. Schultz, J. Miller, F. Shubitidze, and R. Evans, “Underwater Controlled Source Electromagnetic Sensing: Locating and Characterizing Compact Seabed Targets”, *IEEE Oceans*, pp. 1-9, 2012.
- [8] W. Luo, H. Dong, J. Ge, H. Liu, B. Bai, C. Zhang, Z. Yuan, J. Zhu, H. Zhang, “Design and Characterization of an Ultralow-Potential Drift ag/AgCl Electric Field Sensor”, *Chi. Cont. Conf.*, pp. 10263-10266, 2018.
- [9] D. Pozar, *Microwave Engineering*, Wiley, MA, pp. 495-496, 2005.
- [10] <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/low-noise-inamp-nanovolt-sensitivity.html> (retrieved on Mar. 28, 2022).
- [11] R. Wei, Z. Liu, and R. Zhu, “Low noise chopper-stabilized instrumentation amplifier with a ripple reduction loop”, *Ana. Int. Circ. Sig. Proc.*, Vol. 96, No. 3, pp. 521-529, 2018.