

수중 광통신 환경에서 최적 파장을 도출하기 위한 실험적 해석

곽동현*, 전승일*, 최정락*, 한민석**

Experimental Analysis to Derive Optimal Wavelength in Underwater Optical Communication Environment

Dong-Hyun Kwak*, Seung-il Jeon*, Jung-rak Choi*, Min-Seok Han**

요약 본 논문은 수중 환경에서의 전통적인 음파 통신을 대체할 수 있는 레이저 통신의 해군 적용 방안을 연구한다. 아두이노 및 MATLAB을 활용한 레이저 송수신기를 구성하여 수조 실험을 진행하여 다양한 수중 환경에서 통신 가능 여부를 확인하였다. 첫 번째 실험에서는 레이저를 통해 데이터를 전송할 때, 통신 간 원하는 메시지를 데이터화하여 전송하고 이를 수신하여 올바른 메시지로 변환되는지 확인하였다. 두 번째 실험에서는 수중 상황에서의 통신 작동 여부를 확인하였으며, 세 번째 실험에서는 CDS 조도 센서 모듈을 사용하여 빛의 세기를 측정하고 다양한 수중 상황에서 레이저 통신의 한계를 측정하여 확인하였다. 또한, MATLAB Code를 활용해 염도, 수온, 수심 등의 데이터를 수집하여 탁도를 계산하고 계산된 탁도(5, 20, 55, 180)에 대해서 최적의 파장값(532nm, 633nm, 785nm, 1064nm)을 제시하였다. 이를 바탕으로 해군 전술 통신, 원격 센싱, 수중 드론 제어 등의 분야에서의 활용방안을 중점적으로 분석한다. 마지막으로 현재의 기술 한계를 극복하고 성능을 향상하는 개선방안을 제시하였다.

Abstract This paper investigates the naval application of laser communication as a potential replacement for traditional acoustic wave communication in underwater environments. We developed a laser transceiver using Arduino and MATLAB, conducting a water tank experiment to validate communication feasibility across diverse underwater conditions. In the first experiment, when transmitting data through a laser, the desired message was converted into data and transmitted, received, and confirmed to be converted into the correct message. In the second experiment, the operation of communication in underwater situations was confirmed, and in the third experiment, the intensity of light was measured using the CDS illuminance sensor module and the limits of laser communication were measured and confirmed in various underwater situations. Additionally, MATLAB code was employed to gather data on salinity, water temperature, and water depth for calculating turbidity. Optimal wavelength values (532nm, 633nm, 785nm, 1064nm) corresponding to calculated turbidity levels (5, 20, 55, 180) were determined and presented. The study then focuses on analyzing potential applications in naval tactical communication, remote sensing, and underwater drone control. Finally, we propose measures for overcoming current technological limitations and enhancing performance.

Key Words : Underwater laser communication, changing underwater environments, applying MATLAB & Arduino to naval operations, optimal wavelength.

1. 서론

현대의 최근 수중에서의 해양 탐사, 수중 환경 모니터링

터링, 항해 및 해군 작전에 대한 수요가 증가함에 따라, 수중 통신 기술에 관한 연구가 활발히 이루어지고

This Paper was supported by Research Fund of Republic of Korea Naval Academy in 2023.

*Department of Electronics and Control Engineering, Republic of Korea Naval Academy

**Corresponding Author : Department of Electronics and Control Engineering, Republic of Korea Naval Academy (mshan1024@navy.ac.kr)

Received December 08, 2023

Revised December 11, 2023

Accepted December 17, 2023

있다. 전통적인 수중에서의 음파 통신 기술은 낮은 대역폭, 전송 대역폭의 제한, 높은 지연 시간, 보안에서의 취약성 등의 한계로 인해 무선 통신 분야에서는 다양한 기술을 개발해 왔다.

다양한 기술 중에서 최근에는 레이저 통신 기술이 수중 통신 분야에서 대안으로 주목받고 있다. 수중 레이저 통신은 빠른 전송속도, 높은 대역폭, 낮은 지연 시간 및 강력한 보안성과 같은 많은 이점을 제공한다 [1]. 이러한 이점 덕분에 수중 레이저 통신은 해군 작전의 효율성과 안정성을 향상하는 데 큰 도움이 될 것으로 전망된다.

본 논문은 다양한 수중 광통신 환경에서 최적 파장을 도출하기 위한 실험적 해석을 통해 이러한 기술이 해군의 다양한 환경과 임무 수행에 어떻게 적용될 수 있는지를 중점적으로 살펴보고자 한다. 수중 레이저 통신이 어떻게 해군에 도움이 되는지를 이해하기 위해 기존의 음파 통신 기술과 비교 분석하여 수중 레이저 통신 기술이 해군 전송 통신, 원격 센싱, 수중 드론 제어 등의 다양한 작전 분야에서 어떻게 활용될 수 있는지에 대해 설명한다.

또한, 수중 레이저 통신 기술의 미래 전망을 제시한다. 현재의 기술 한계를 극복하고 더욱 향상된 성능을 제공할 수 있는 개선 사항 및 요구사항에 대해 논의한다. 특히 수중 센서 데이터 통신과 잠수함, 수중 드론(AUV) 등과 같은 수중 통신 물체들의 통신에 대해 다루며, 이를 활용한 수중 정찰 및 위협 탐지 방법을 제안한다. 이를 통해 수중 레이저 통신이 해군 작전에 더

2.1 수중 레이저 통신의 개념과 원리

수중 레이저 통신은 물속에서 레이저를 사용하여 정보를 전송하는 통신 방식으로, 일반적인 레이저 통신과 비슷하게 레이저를 사용하여 정보를 암호화한 뒤, 이를 수신기가 받아서 디코딩하는 과정을 거친다. 물리적 거리를 극복하기 위해 최적의 빛의 파장을 사용하여 물속에서 정보를 전달하는 이 방식은 수중 통신에 있어 혁신적인 해법으로 여겨진다.

2.2 수중 레이저 통신의 개요 및 특징

수중 레이저 통신은 레이저를 이용하여 데이터를 전송하는 기술로, 기존에 수중 통신 시 주로 사용하는 수중 음향 통신에 비해 많은 장점을 가져 차세대 수중 통신으로 주목받으며 지속적인 연구와 개발이 진행되고 있다 [2].

레이저의 크기를 같을 때, 수중 레이저 통신은 수중 음향 통신보다 높은 초고주파를 통해 데이터를 전송하여 빠른 데이터 전송 속도를 보장한다. 표 1을 보면 수중음향통신은 Kbps, RF는 Mbps 수준의 데이터 전송 속도를 보이지만 수중 레이저 통신은 Gbps 수준의 데이터 전송 속도를 보인다.

표1. 수중 무선 통신 기술 비교 [3]

Table 1. Comparison of underwater wireless communication technologies [3]

Parameter	Acoustic	RF	Optical
Attenuation	Distance and frequency dependent (0.1-4dB/km)	Frequency and conductivity dependent (3.5-5dB/m)	0.39dB/m (ocean) 11 dB/m (turbid)
Speed	1500ms ⁻¹	2.3 × 10 ⁸ ms ⁻¹	2.3 × 10 ⁸ ms ⁻¹
Data Rate	kbps	Mbps	Gbps
Latency	High	Moderate	Low
Distance	more than 100km	≤10m	10-150m (500m potential)
Bandwidth	1kHz-100kHz	MHz	150MHz
Frequency Band	10-15kHz	30-300MHz	5 × 10 ¹⁴ Hz
Transmission Power	10W	mW-W	mW-W

날씨 변화에 영향을 받지 않으며, 다른 수중 장비에 영향을 미치지 않는 등 안정적인 통신이 가능하다. 이러한 장점들로 인해 수중 레이저 통신은 해양 연구, 해양산업, 군사용도 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 그러나 수중 환경에서 레이저 광선의 감쇠와 위치 결정 등의 기술적인 문제를 극복해야 한다.

2.3 수중 레이저 통신의 문제점 및 개선방안

수중에서 레이저 통신을 사용하면서 발생하는 문제점들은 다양하다. 수온·수심에 따른 신호의 감쇠, 레이저의 퍼짐 현상, 물의 굴절을 변화, 수중 장애물 등이 있다. 이러한 제약들은 수중 레이저 통신 기술의 발전을 방해하고, 효율적인 데이터 전송에 어려움을 줄 수 있다.

현재에는 이러한 문제점들에 대한 대응책이 제시되고 있다. 레이저 파장을 최적화하고 수온 센서를 활용하여 데이터 전송 속도와 정확도에 대한 보상을 수행하는 등의 기술 개발이 진행되고 있다 [4-6].

이러한 수중 레이저 통신 기술의 발전을 통해 수상함, 무인 잠수정, 무인 잠수정과 무인 잠수정 간의 통신 등 다양한 활용방안을 모색할 수 있다. 그러나 이러한 방안들도 각각의 문제점이 존재한다. 문제점을 개선하기 위해서는 경로 선택, 신호 분산, 다중 경로 전송 등의 방법을 활용하여 효과적으로 대처해야 한다.

3. 시스템 설계 및 구현

3.1 하드웨어 설계

그림 1은 수중 레이저 통신에 대한 실험을 위해 구현된 송신기와 수신기 블록도를 나타낸다. 송신기는 DM-104 아두이노 레이저 모듈을 이용하여 레이저를 방사하였고 5V의 전압으로 650nm의 적색 레이저를 방사하여 데이터를 전송한다.

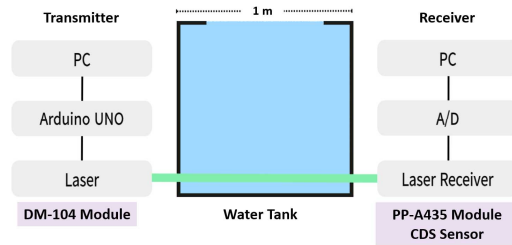


그림 1. 구현된 송신기와 수신기 블록도

Fig. 1. Implemented transmitter and receiver block diagram

수신기는 PP-A435 모듈과 CDS 조도 센서 모듈을 사용하였다. 수신기에 사용된 PP-A435 모듈은 레이저 수신 센서로, 레이저 모듈에서 방사한 레이저를 수신부에서 수신하여 속에 담긴 데이터를 해석한다. CDS 조도 센서 모듈은 수중 통신 상황에서 빛의 세기를 측정하여 다양한 수중 상황에서 레이저 통신의 한계를 확인할 수 있는 측정 도구로 사용하였다. 수중 레이저 통신에 대한 실험은 각 통신 과정별로 아래와 같이 단계별로 별도의 실험을 진행하였다.

첫 번째 실험에서는 레이저를 통해 데이터를 전송할 때, 통신 간 원하는 메시지를 데이터화하여 전송하고 이를 수신하여 올바른 메시지로 변환되는지 확인하였다. 두 번째 실험에서는 수중 상황에서의 통신 작동 여부를 확인하였으며, 세 번째 실험에서는 수중 상황에서 레이저 통신의 한계를 측정하여 확인하였다.

3.2 소프트웨어 설계

그림 2는 소프트웨어로 구현된 DM-104 모듈의 메시지 이진화 및 SPI 통신코드를 나타낸다. DM-104 모듈은 이진 코드로 변환된 '적 잠수함 발견(Red Submarine Found)' 메시지를 레이저 신호로 변환하여 일정한 간격으로 전송한다. 문자는 1과 0으로 변환되고 10마이크로초의 간격으로 1과 0의 출력값을 전달한다. 입력된 신호로 모듈은 레이저를 방사하여 데이터를 송신한다. 통신의 효율성을 높이기 위해서 여러 비트를 하나씩 전송하는 직렬 통신의 방법보다 여러 비트를 동시에 전송하는 아두이노의 SPI 병렬 통신을 적용한다. 병렬 통신은 비트를 동시에 전송하기 때

문에 전송시간을 크게 줄이고 전송속도를 높여 효율적인 통신이 가능하다.

```

13 // Convert the data to binary code
14 String data = "Red Submarine Found";
15 String binary_data = "";
16 for (int i = 0; i < data.length(); i++) {
17     binary_data += String(data[i], BIN);
18 }
19 // Concatenate the binary code
20 for (int i = 0; i < binary_data.length(); i++) {
21     binary_message += binary_data[i];
22 }
23 // Set up the laser pin as an output
24 pinMode(laserPin, OUTPUT);
25
26 // Initialize SPI communication
27 SPI.begin();
28 // Set the SPI data mode
29 SPI.setDataMode(SPI_MODE0);
30 }
    
```

그림 2. DM-104 모듈의 메시지 이진화 및 SPI 통신 코드
Fig. 2. Message binarization and SPI communication code for DM-104 module

```

33 // Convert the binary message to a laser signal
34 const int pulseDuration = 10; // 10 us
35 const int signalLength = binary_message.length() * pulseDuration * 100;
36 int signal[signalLength];
37 for (int i = 0; i < binary_message.length(); i++) {
38     for (int j = 0; j < pulseDuration * 100; j++) {
39         signal[i * pulseDuration * 100 + j] = (binary_message[i] == '1') ? 1 : 0;
40     }
41 }
42 // Generate the laser signal
43 int amplitude[signalLength];
44 for (int i = 0; i < signalLength; i++) {
45     amplitude[i] = (signal[i] == 1) ? power : 0;
46 }
47
48 // Send the laser signal using SPI
49 digitalWrite(laserPin, LOW); // Set the SS pin low to enable SPI communication
50 for (int i = 0; i < signalLength; i++) {
51     SPI.transfer(amplitude[i]); // Send the amplitude value using SPI
52 }
53 digitalWrite(laserPin, HIGH); // Set the SS pin high to disable SPI communication
    
```

그림 3. DM-104 모듈의 이진 메시지의 레이저 전송 코드
Fig. 3. Laser transmission code of binary messages in the DM-104 module

그림 3과 같이 DM-104 모듈의 이진 메시지의 레이저 전송 코드를 송신하고 그림 4와 같이 PP-A435 모듈은 레이저로 전송된 이진 메시지를 수신한다. 수신부를 통해 레이저 신호를 수신하고 수신된 이진수 형태의 데이터를 다시 문자화하여 메시지로 디코딩한다. 수신기의 시간 간격은 송신기와 마찬가지로 10마이크로초로 하여 오류의 발생을 최소화한다. 수신기는 전송된 이진 코드를 수신하여 이를 다시 문자열로 재배열한다. 송신된 데이터의 문자열이 한 번에 전송되므로 디코딩된 문자열은 'Received Message:'의 형태로 결과 창에 'Red Submarine Found'가 표시된다.

```

33 // Convert the binary message to a laser signal
34 const int pulseDuration = 10; // 10 us
35 const int signalLength = binary_message.length() * pulseDuration * 100;
36 int signal[signalLength];
37 for (int i = 0; i < binary_message.length(); i++) {
38     for (int j = 0; j < pulseDuration * 100; j++) {
39         signal[i * pulseDuration * 100 + j] = (binary_message[i] == '1') ? 1 : 0;
40     }
41 }
42 // Generate the laser signal
43 int amplitude[signalLength];
44 for (int i = 0; i < signalLength; i++) {
45     amplitude[i] = (signal[i] == 1) ? power : 0;
46 }
47
48 // Send the laser signal using SPI
49 digitalWrite(laserPin, LOW); // Set the SS pin low to enable SPI communication
50 for (int i = 0; i < signalLength; i++) {
51     SPI.transfer(amplitude[i]); // Send the amplitude value using SPI
52 }
53 digitalWrite(laserPin, HIGH); // Set the SS pin high to disable SPI communication
    
```

그림 4. PP-A435 모듈의 수신 코드
Fig. 4. Receive code for PP-A435 module

CDS 조도 센서 모듈은 레이저의 세기를 측정하여 레이저의 크기를 나타내는 일정한 수치로 변환하는 수신 모듈이다. CDS 센서는 빛의 강도를 측정하여 결과를 출력하며 결과 수치는 조도로 표현된다. 이때 조도의 단위는 룩스(Lux)이다.

4. 실험 및 결과 분석

4.1 실험 과정

표 2. 단계별 세부 실험 조건

Table 2. Comparison of underwater wireless communication

Experimental Setup	Detailed Condition
1st	Check sent and received messages
2nd	Determination of whether laser communication is possible depending on the environment (three water tanks measuring 30cm wide and 5cm high were installed in a row and the communication distance was set to 1m)
3rd	Comparison of measured values of CDS illuminance sensor according to environment (same condition to 2nd, change to (PP-A435 Module => CDS Sensor)

표 2는 단계별 세부 실험 조건을 나타낸다. 1번 실험에서 전달하려는 메시지를 이진 코드로 변환하고 레이저 신호로 변환하여 방출한다. 방출된 레이저는

PP-A435 모듈의 수신부에 수신되어 원래 메시지로 디코딩되어 출력되는 것을 확인한다.

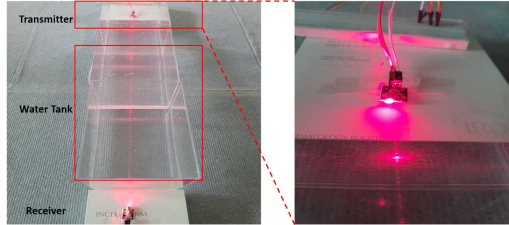


그림 5. 실험 환경 설정
Fig. 5. Experiment environment settings

2번 실험에서는 그림 5와 같이 가로와 세로 각각 30cm, 높이 5cm의 수조 3개를 연속으로 설치하여 통신 거리를 1m로 설정하였다. 위 환경에서 1번 실험을 반복한다. 실험은 대조군으로 일반적인 대기 상황, 수조에 물만 넣은 상황으로 설정하고 비교군으로 염도의 수치, 불순물의 양을 각각 다르게 설정하였다.

3번 실험에서는 CDS 조도 센서 모듈을 사용하여 수신기의 성능을 평가한다. 이전 실험과 동일한 조건에서 CDS 조도 센서의 수신부에 레이저를 조사하여 광량이 얼마나 변화하는지 측정한다. 이를 통해 수중 상황에서 레이저 통신의 한계를 정량적으로 확인할 수 있다.

4.2 실험 결과

1번 실험에서 각 송수신 장치의 작동이 정상적으로 작동함을 확인하였다. 송신 메시지가 'Red Submarine Found'가 정상적으로 송신되었고 수신기가 수신하여 모니터에 'Message Received: Red Submarine Found'의 결과를 출력하였다. 이를 통해 본 연구를 진행하기 위한 전제조건인 기본적인 레이저 통신이 가능함을 확인하였다.

2번 실험을 통해 수중 상황에서 메시지를 전달할 수 있는지를 확인하였다. 수조 3개를 합쳐 수조에 물을 채워 넣은 상황에서 아래 표에 나와 있는 다양한 수중 환경을 조성하여 각 실험을 3회씩 진행하였다. 각 실험에 관한 통신 결과는 1번 실험의 결과와 같고 실험들의 종합적인 결과는 표 3과 같다.

표 3. 환경에 따른 레이저 통신 가능 여부 판단

Table 3. Determination of whether laser communication is possible depending on the environment

Experiment	1 st	2 nd	3 rd
empty tank	O	O	O
basic water	O	O	O
sea water (120g of salt)	O	O	O
sea water (240g of salt)	O	O	O
sea water (120g of salt + dirt 3.5g)	X	O	X
sea water (120g of salt + dirt 7g)	X	X	X
sea water (120g of salt + plastic debris 3.5g)	X	X	O
sea water (120g of salt + plastic debris 7g)	X	O	X

O : 통신 가능, X : 통신 불가능

표 3에서 레이저 통신은 해수의 상황에서 가능한 것을 확인할 수 있었다. 염도가 증가해도 동일하게 통신이 가능하며 불순물을 첨가하여도 통신이 일부 가능하였다. 일정량 이상의 불순물로 물의 혼탁도가 심해졌을 경우 육안으로도 통신 자체가 불가능함을 확인하였다. 특히 흙의 경우 미세플라스틱과 같은 양을 첨가하여도 수신 감도가 낮음을 확인하였다.

3번 실험에서 각 실험 별로 통신 감도가 어느 수준까지 감소하는지 확인하였다. 2번 실험과 동일한 상황에서 수신기를 PP-A435 모듈에서 CDS 조도 센서 모듈로 교체하였다. 일반적으로 CDS 조도 센서는 빛의 세기를 측정할 수 있는 장치로 레이저의 세기를 측정할 수 없다. 하지만 레이저가 CDS 센서의 수신부를 조사할 때 CDS 센서의 결과값이 현저하게 감소한 것을 확인할 수 있었다. 즉, 레이저가 센서의 수신부를 가리는 역할을 한다. 이를 바탕으로 CDS 센서의 측정값을 비교하여 레이저의 통신 감도를 각 3회 실시하여 비교하였다. 실험에 대한 수치는 표 4와 같다.

표 4. 환경에 따른 CDS 조도 센서의 측정값 비교
Table 4. Comparison of measured values of CDS illuminance sensor according to environment

Experiment	1 st	2 nd	3 rd	average
General Situation	698	702	699	699.67
empty tank	6	5	7	6
basic water	9	12	11	10.67
sea water (120g of salt)	23	26	24	24.3
sea water (240g of salt)	30	29	32	30.3
sea water (120g of salt + dirt 3.5g)	180	175	177	177.3
sea water (120g of salt + dirt 7g)	270	269	273	270.76
sea water (120g of salt + plastic debris 3.5g)	88	91	92	90.3
sea water (120g of salt + plastic debris 7g)	134	129	132	131.67

(단위 : 룩스(Lux))

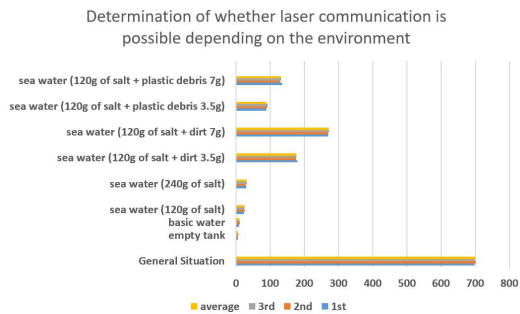


표 4에서 레이저를 조사하지 않았을 때 CDS 센서의 출력값은 약 700룩스를 유지한다. 빈 수조에서는 출력값이 약 6룩스이다. 이를 통해 레이저가 CDS 센서의 수신부를 조사하였을 때 수신부를 가려 센서가 빛을 거의 감지하지 못하는 것을 확인하였다. 수조에 물을 담았을 때 출력값은 조금 상승한 약 11룩스를 보인다. 즉, 물 분자에 의해 레이저 일부가 산란, 반사, 굴절이 이루어짐을 알 수 있다. 물을 해수 염도에 맞추었을 때는 그 수치가 상승하여 약 24룩스이다. 이는 소금 분자에 의해 레이저 수중 통신이 방해요소로 영향을 받음을 보여준다.

흙을 첨가하였을 때는 출력값이 급상승하였다. 흙

이 수조에 충분히 퍼진 상황에서 수치가 기하급수적으로 증가한 것은 흙에 의해 혼탁해진 물이 레이저의 진행에 영향을 미친것을 알 수 있다. 또한, 출력값이 흙 3g을 첨가한 177룩스일 때는 어느 정도 통신이 가능했으나 7g을 첨가한 270룩스를 넘어가면 통신 자체가 불가능하였다. 육안으로 확인하였을 때 흙 3g의 경우 레이저의 직진성이 일부 확인되었으나 7g 때는 레이저가 약 3cm 정도 직진하다가 중간에 산란하여 직진하지 못하였다. 미세플라스틱을 첨가하였을 경우, 출력값이 상승하는 것은 흙과 동일하나 그 수치가 현저히 낮았으며 2번 실험에서도 통신 감도가 흙보다 양호하였다. 다만 미세플라스틱 실험에서 레이저가 직진하다가 중간에 플라스틱들에 의해 일부 굴절, 산란하는 것을 확인할 수 있었다.

흙과 미세플라스틱을 비교해보면 불순물로 같은 양을 첨가하여도 출력 수치가 상이였다. 미세플라스틱은 수중에 떠다니는 플라스틱 입자에 의해 레이저 통신에 방해요소라면 흙은 미세플라스틱보다 작은 입자의 크기를 가져 수조 속 물의 혼탁도를 증가시켜 통신에 방해요소로 작용하였다. 실험에 사용된 미세플라스틱은 대체로 5mm 이하의 입자크기를 가지지만 흙은 입자의 크기가 2mm보다 작은 크기의 입자들로 구성되었다. 이 결과를 토대로 레이저 통신은 해양환경 속에서 입자들에 의한 반사, 굴절, 산란에 의한 통신 감도 감소보다 혼탁도에 더 민감하게 반응하였다. 이는 수중에서 레이저 통신을 활용할 때 특정 환경에 유용하게 활용되거나 특정 환경에서 사용을 제한하는 방향으로 적용될 수 있다. 수중 환경이 다른 물질들로 인하여 혼탁도가 심한 연안과 같은 환경에서는 레이저를 활용한 통신이 제한될 수밖에 없을 것이다. 하지만 혼탁도가 낮은 먼 바다로 나간다면 레이저 통신은 효율적인 통신수단이 될 것이다.

본 연구의 과정에서 통신에 가장 큰 영향을 준 요소는 탁도이다. 탁도가 심해짐에 따라 통신 감도가 감소하였고 레이저의 직진성 등 여러 특징적 요소들이 감소하였다. 탁도에 따른 파장의 변화는 이 문제에 대한 해결책으로 제시될 수 있다. 최근의 연구에는 각기 다른 파장을 가진 레이저를 항공기에서 수면으로 조사하여 수중 탁도를 계산하는 특허가 개발되어있다. 이에

따르면 수중의 탁도를 계산하기 위해 항공기에서 각각 다른 파장을 가진 레이저 2개를 수면으로 조사하였을 때 두 레이저가 반사되어 돌아오는 값을 비교하여 탁도를 계산한다. 즉, 어떤 수치를 가지는 탁도에 대하여 통신 감도, 직진성 등의 특징이 감소하는 파장이 있고 이러한 감소가 덜한 파장이 존재함을 알 수 있다. 이러한 특징을 활용하면 반대로 탁도를 알 때 그 환경에 적합한 파장을 계산할 수 있다. 이 계산을 통해 도출된 값을 파장으로 사용하면 통신할 수 있다. 이에 대하여 그림 6과 같은 MATLAB 코드를 제시한다. 이 코드는 염도, 수온, 수심 등의 데이터를 수집하여 탁도를 계산하고 계산된 탁도에 최적의 파장값을 제시하는 코드이다. 이때 탁도의 계산은 여러 탁도 측정 장치로 탁도를 측정할 수 있다.

```

1 turbidity = 35; % 탁도 값 입력
2 calculateLaserWavelength(turbidity);
3
4 function calculateLaserWavelength(turbidity)
5
6     if turbidity < 10
7         laserWavelength = 532;
8     elseif turbidity >= 10 && turbidity < 50
9         laserWavelength = 633;
10    elseif turbidity >= 50 && turbidity < 100
11        laserWavelength = 785;
12    else
13        laserWavelength = 1064;
14    end
15
16    disp(['탁도:', num2str(turbidity), ' 적합한 레이저
17    end
    
```

그림 6. 탁도에 따른 최적의 레이저 파장 제시
 Fig. 6. Proposal of optimal laser wavelength according to turbidity

Command Window	
탁도:5	적합한 레이저 파장: 532nm
탁도:20	적합한 레이저 파장: 633nm
탁도:55	적합한 레이저 파장: 785nm
탁도:180	적합한 레이저 파장: 1064nm

그림 7. 탁도에 적합한 레이저 파장
 Fig. 7. Laser wavelength suitable for turbidity

코드에 따라 실험을 진행하였을 때 위와 같은 결과가 도출된다. 각 탁도에 따른 다른 파장이 제시되었으며 각 환경에 적합한 파장을 제시하였음을 보여준다. 즉, 각 환경에서 통신에 최적의 조건을 만족하는 파장이 존재함을 알 수 있다. 이때, 도출되는 파장을 분석

해보면 탁도의 값이 증가할수록 적합한 파장의 값이 같이 증가한다. 이는 레이저의 파장이 클수록 혼탁한 수중 상황에서 통신에 적합하다는 결론을 도출하였다 [7].

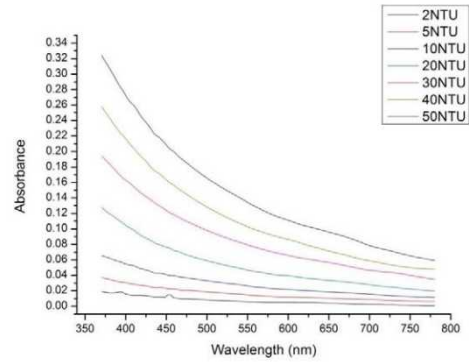


그림 8. 탁도와 레이저 파장과의 관계 [8]
 Fig. 8. Relationship between turbidity and laser wavelength [8]

그림 8은 탁도와 레이저 파장의 상관관계를 연구한 논문에서 발췌한 그래프이다. 해당 논문에 따르면 레이저 파장이 클수록 높은 수치의 탁도에서 산란과 흡수율이 낮아지는 현상을 나타낸다고 저술하였다. 또한, 레이저 파장 하나를 고정한 상태에서 다른 탁도로 실험하였을 때 통신에 적합한 임계 탁도값도 논문에서 제시하였는데 이 수치와 그림 6에서 제시한 코드에서 구분한 탁도값과 파장값이 거의 일치함을 확인할 수 있다.

이로써 탁도에 따른 레이저 파장을 다르게 제시한 코드가 실제로 통신에 효과적이며 제시한 파장값도 통신에 적합한 수치라는 것을 확인할 수 있다.

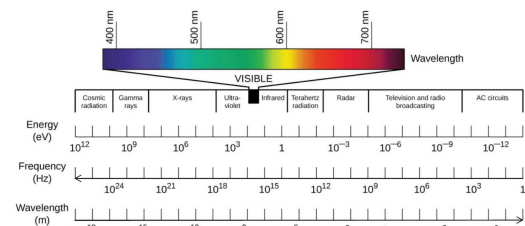


그림 9. 파장에 따른 빛의 종류와 특징
 Fig. 9. Types and characteristics of light according to wavelength

그림 9는 파장에 따른 빛의 종류와 특징을 나타낸다. 레이저는 높은 파장에서 광선이 산란하는 경향이 줄어들다. 이는 광선의 특정 방향으로 진행되는 직진성을 유지하고 빛의 손실을 최소화한다. 또한, 물에 의해 흡수되는 양이 감소하여 물에서의 투과성이 향상된다. 높은 파장의 레이저는 물에 의한 굴절을 감소시킨다 [9]. 또한, 같은 수중 상황에서도 레이저 빛이 적색광, 황색광, 청색광, 자색광 등에 따라 데이터 손실값이 다르다. 손실값은 자색광에서부터 적색광 순서로 적은 손실값을 보여주었으며 이는 레이저의 빛이 적색광으로 갈수록 파장값이 증가하는데 파장이 증가할수록 수중 상황에서 손실을 줄이고 통신 수치를 증가시킨다는 것을 강조한다[10]. 이와 같은 높은 파장의 레이저 특징은 통신의 손실을 최소화하고 신호의 강도와 통신 감도가 유지되도록 하며 효과적인 통신을 가능하게 한다.

물의 혼탁도는 본 연구의 실험에서 가장 영향을 많이 주었다. 하지만 탁도에 따른 파장값을 다르게 한다면 혼탁한 수중 상황에서도 효과적인 통신이 가능함을 확인하였다.

5. 해군 적용을 위한 활용방안

레이저 수중 통신의 환경에 따른 통신 상태를 알아보는 실험을 통해 레이저 수중 통신의 한계점과 개선 사항 등을 알아보았다. 실험의 결과를 토대로 레이저 수중 통신이 음파 통신과 비교하여 어떠한 장점이 있고, 어떤 방향으로 해군에 적용되는지 알아본다.

잠수함 통신은 잠수함-수상함, 잠수함-잠수함, 잠수함-항공기 간 통신이 가능하며, 높은 대역폭과 신뢰성을 갖추어 잠수함 내부와 외부 간 안정적인 통신이 가능하게 한다. 특히, 수심이 깊은 지역에서도 음파 통신과 비교하여 안정적인 통신이 가능하며, 다수의 센서 데이터를 빠르게 전송할 수 있는 장점을 갖고 있다. 이러한 잠수함 통신 기술은 대한민국 해군에서도 적극적으로 도입되어 현재 잠수함의 중요성이 주목받고 있으며, 전력을 대폭 들여 발전해나갈 수 있는 기술 중 하나이다.

해양 작전에서는 앞으로 드론, 로봇 등의 무인 기술

이 더욱 발전하면서, 수중 드론 및 로봇 간의 통신이 중요한 역할을 할 것으로 예상된다. 이러한 무인 기술을 이용한 다중작전은 단일 작전보다 더욱 효율적이며, 레이저 통신 기술을 활용하면 드론, 로봇 간의 통신을 더욱 신속하고 정확하게 처리할 수 있으며, 다수의 데이터를 송/수신할 수 있다. 따라서, 이러한 수중 드론 및 로봇 간의 레이저 통신 기술은 앞으로의 해양 작전에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

수중 센서 데이터 통신 기술은 해저 센서 설치와 레이저 통신을 활용하여 수중에서의 위험 요인 탐지와 경보 시스템으로 활용할 수 있는 기술이다. 이 기술은 음파 통신보다 안정적인 통신이 가능하며, 다수의 센서 데이터를 빠르게 전송할 수 있다. 이러한 장점을 활용하여 북한 잠수함이 활동하는 지역을 중심으로 수중 센서를 격자 모양으로 설치하여 북한 잠수함에 대한 위협을 줄이고, 제해권 확보에 큰 역할을 할 수 있다. 이를 통해 천안함 사건과 같은 사고를 예방할 수 있으며, 미 해군이 미국 연안에 수중 센서를 설치하여 데이터를 수집하고 있는 것처럼, 북한 및 주변국의 잠수함 위협에 대비할 수 있다. 이러한 수중 센서 데이터 통신 기술은 해양 보안 분야에서 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

수중 센서 데이터 통신은 해저 센서 설치와 레이저 통신을 활용하여 수중에서의 충돌, 침몰, 기타 위험 요인을 탐지하여 경보 시스템으로 활용할 수 있으며, 북한 잠수함에 대한 위협을 줄이고 제해권 확보에 큰 역할을 할 수 있다. 또한, 잠수함-수중 드론(AUV) 통신에는 레이저 수중 통신을 사용하며, AUV는 잠수함을 감지하는 센서 플랫폼으로 사용될 수 있으며, 수상함 또는 다른 잠수함과 함께 사용될 수 있다. AUV는 기뢰 수색이나 수중 정찰과 같은 임무에 적합하며, 위험 가능성이 큰 기뢰 표적을 감지하여 폭발성 탄약/기뢰를 제거할 수 있다. 또한, AUV는 정보, 감시, 정찰(ISR) 역할에도 적합하며, 해안에 있는 적 군함이나 시설에 대한 정보 수집, 수로 순찰, 병력 투입 또는 상륙 작전 수역과 해안 부근 육상 또는 기타 적진 동향정보 수집이 가능하다. 이러한 기술은 북한 및 주변국의 잠수함 위협에 대비하는 데 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

앞에서 기술한 사항들은 아래 사항을 근거로 실현될 수 있다. 미국 해군은 항공기와 잠수함 사이의 레이저 통신에 성공한 사례가 있다. 해당 실험에서는 깊은 바다에서 청색 광의 레이저가 가장 적합하다는 결과가 나왔으며, 약 532nm 파장의 레이저를 사용하여 데이터 전송 성공률이 약 80% 이상을 보여주었다. 이를 바탕으로 레이저 통신은 현실 가능한 효과적인 통신 기술로 인정되고 있다.

또한, 수중 레이저 통신의 다양한 수중 환경 속에서 대용량 데이터를 전송할 수 있도록 강력한 채널 부호화 방식을 적용하고 있다. 채널 부호화는 전송된 데이터의 오류를 감지하고 수정하는 데 도움이 되는 방법으로, 최근 연구에서는 LDPC 부호화 기법에 주목하고 있다. LDPC 부호화는 성능이 우수하고, 복잡한 여러 패턴에 대해서도 효과적인 대응이 가능하다.

레이저 통신에서는 스프레드 스펙트럼 기술을 사용하여 전송 신호의 대역폭을 확장하고 통신 성능을 향상시킬 수 있다. 이 기술에는 직접 시퀀스 스프레드 스펙트럼(DSSS)과 주파수 호핑 스프레드 스펙트럼(FHSS)이 주로 사용된다. DSSS는 데이터 비트를 고유한 비트 패턴으로 변환하여 신호를 확산시키고, FHSS는 여러 주파수 채널로 신호를 분할하여 빠르게 채널을 변경함으로써 간섭에 대처한다. 이러한 스프레드 스펙트럼 기술은 레이저 신호의 흡수와 산란에 의한 영향을 줄이고 통신 성능을 개선하는 역할을 한다.

5. 결론

본 논문에서는 MATLAB과 아두이노 프로그램을 활용한 레이저 기반의 수중 통신 시스템을 구현하고 해군 적용 방안을 도출하였다. 이 연구는 수중에서 레이저를 사용한 통신이 전통적인 방식보다 어떻게 더 효과적일 수 있는지를 살펴보고, 해군에서 어떻게 적용될 수 있을지 탐구하였다.

실험 과정에서 탁도가 통신에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 탁도 문제를 해결하기 위해서 레이저의 파장을 다르게 하는 방법을 시도하였고 이를 뒷받침 가능한 관련 논문을 통해 근거를 제시하였다. 또한, 탁도별로 다른 파장을 제시하는 MATLAB 코드를 작성하여 해결방안을 모색하였다.

레이저 통신 시스템은 수중에서 높은 대역폭과 낮은 지연율을 제공함으로써, 현재의 음파 통신 방식과 비교하여 높은 데이터 전송률을 실현할 수 있었다. 또한, 레이저 통신은 간섭에 대한 저항력이 강해 수중 환경에서의 통신 안정성을 향상하는데 기여하였다.

이러한 레이저 기반의 수중 통신 시스템은 해군에서 다양한 분야에 적용될 수 있다. 예를 들어, 잠수함 간의 의사소통, 해저 센서 네트워크, 무인 수중 탐색 장비 등의 작동에 있어 높은 효율성과 정확성을 제공할 것이다. 이는 정보 수집과 전송의 신속성을 향상시켜 미래 작전 상황에서 큰 성과를 거둘 수 있게 해 줄 것이다.

결과적으로 본 연구는 레이저 기반의 수중 통신이 기존 음파 통신 방식보다 우수한 성능을 보이며, 해군 작전에 높은 가치를 제공함을 입증하였다. 앞으로 이 기술의 발전과 함께 해군 통신 시스템의 진화가 기대되며, 전방위적인 해양 안보와 작전 지원에 기여할 것으로 예상된다.

REFERENCES

- [1] S. Kim, "A Study on Sloped Pulse Position Modulation in Underwater Laser Wireless Communication," Master's Thesis, Korea Maritime & Ocean University, 2018.
- [2] D. Kwon, "Underwater Wireless Optical Communication," EIRIC, vol.45, no.5, pp.49-56, 2018.
- [3] H. Kaushal, et al. "Underwater Optical Wireless Communication," IEEE Access, pp.1518~1547, April 2016.
- [4] Y. Abueejela, A. S. Guinaum, and A. Algitta, "Measuring Turbidity of Water Based Photo Voltaic Cell and Laser Light," JEEIIT Transactions, vol.1, no.1, pp.49-54, 2020.
- [5] Y. Kim and J. Choi, "Blue Green Lasers and Their Application to Underwater Communication," Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol.16, no.12, pp.1211-1218, 1991.
- [6] Y. Wen, Y. Hu, and X. Wang, "Application of a colorimeter for Turbidity measurement," Journal of Physics: Conference Series 679, pp.1-4,

2015.

[7] Yousef Moh. Abueejela, AbdAlrhman Saleh Guinaum, Alhade A. Algitta. "Measuring Turbidity of Water Based Photo Voltaic Cell and Laser Light," JEEIT TRANSACTIONS,.Vol.1,No.1, July 2020.

[8] Yizhang Wen, Yingtian Hu, Xiaoping Wang. Application of a colorimeter for turbidity measurement. Journal of Physics: Conference Series 679 012028, pp.1-4, 2016.

[9] Se-rim Kim, Ki-man Kim, Tae-woong Kang, Dong-hun lee. "Performance Evaluation of Underwater Wireless Laser Communication by Water Turbidity," 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO), 28-31 May, 2018.

[10] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Underwater Optical Wireless Communication," IEEE Access, vol. 4, pp.1518-1547, 2016.

[11] C. Lu, Li, C. Li, and Z. Xu "Experimental Investigation of Underwater Weak Optical Communication Using a Photomultiplier Tube Receiver," In Proceedings of the Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Hangzhou, China, 26-29 October, pp. 1-3, 2018.

[12] J. Li, Yang, B. Yang, D. Ye, L. Wang, K. Fu, Piao, J. Piao, and Y. Wang, "A Real-Time Full-Duplex System for Underwater Wireless Optical Communication: Hardware Structure and Optical Link Model," IEEE Access, vol.4, p.1-17, 2020.

[13] M. A. Khalighi, H. Akhouayri, and S. Hranilovic, "Silicon-Photomultiplier-Based Underwater Wireless Optical Communication Using Pulse-Amplitude Modulation," IEEE J. Ocean. Eng. 45, pp.1611-1621, 2020.

저자약력

곽 동 현 (Dong-Hyun Kwak) [정회원]



- 2024년 3월 : 해군사관학교 전자 제어공학과 졸업 예정 (공학사)

〈관심분야〉 수중 무선통신시스템, 프로그래밍, 지능제어시스템 설계, ICT Convergence Platform

전 승 일 (Seung-Il Jeon) [정회원]



- 2024년 3월 : 해군사관학교 전자 제어공학과 졸업 예정 (공학사)

〈관심분야〉 수중 무선통신시스템, 프로그래밍, 지능제어시스템 설계, ICT Convergence Platform

최 정 락 (Jung-Rak Choi) [정회원]



- 2024년 3월 : 해군사관학교 전자 제어공학과 졸업 예정 (공학사)

〈관심분야〉 수중 무선통신시스템, 프로그래밍, 지능제어시스템 설계, ICT Convergence Platform

한 민 석 (Min-Seok Han)

[정회원]



- 2002년 : 아주대학교
전자공학 공학사
- 2005년 : 한양대학교
전자통신컴퓨터공학 석사
- 2011년 : 한양대학교
전자통신컴퓨터공학 박사
- 2013년 ~ 2016년 : KAIST (재)
스마트IT융합시스템연구단
연구교수
- 2016년 ~ 2018년 :
오산대학교 전자과 교수
- 2019년 ~ 현재 : 해군사관학교
전자제어공학과 교수

〈관심분야〉 프로그래밍, 인공지능경망, 지능제어시스템 설계,
수중 무선통신시스템, 최적화 알고리즘, ICT
Convergence Platform