



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

수중 레이저 무선 통신에서  
기울어진 펄스 위치 변조 기법에 관한 연구

A Study on Sloped Pulse Position Modulation Method  
in Underwater Laser Wireless Communication



2018年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

金世琳

本 論 文 을 金 世 琳 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 : 工 學 博 士 趙 炯 來

(印)

委 員 : 工 學 博 士 鄭 知 元

(印)

委 員 : 工 學 博 士 金 基 萬

(印)



2018年 06月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	v

## 1. 서 론

## 2. 수중 광 채널특성과 광 소자

2.1 수중 광 채널 전달 특성 .....	4
2.2 광원 및 광 검출기 .....	7

## 3. 레이저 기반 수중 통신을 위한 신호전송

3.1 기존의 신호전송 방법 .....	10
3.1.1 온-오프 키잉 방식 .....	10
3.1.2 펄스 위치 변조 방식 .....	11
3.1.3 변형된 펄스 위치 변조 방식 .....	12
3.2 기울어진 펄스 위치 변조 방식 제안 .....	15

## 4. 모의 및 수조실험 결과

4.1 모의실험 .....	20
4.1.1 실험 설계 .....	20
4.1.2 실험결과 .....	21
4.2 수조실험 .....	26
4.2.1 실험 설계 .....	26
4.2.2 실험결과 .....	28

5. 결론 .....	33
참고문헌 .....	35
감사의 글 .....	38



## List of Tables

Table 1 Comparison of LED and Laser Diode(LD) .....	8
Table 2 Bit error rate by transmission technique and turbidity .....	32



## List of Figures

<b>Fig. 1</b> Absorption of pure seawater as a function of wavelength as given by various authors .....	5
<b>Fig. 2</b> Absorption coefficient of phytoplankton shown for different Jerlov water types .....	6
<b>Fig. 3</b> Absorption and scattering in underwater channels .....	6
<b>Fig. 4</b> Waveform for OOK .....	11
<b>Fig. 5</b> Waveform of PPM for $L=4$ .....	12
<b>Fig. 6</b> Waveform of DPPM .....	13
<b>Fig. 7</b> Waveform of MPPM for $\binom{4}{2}$ .....	13
<b>Fig. 8</b> Waveform of DAPPM for $A=2, L=2$ .....	14
<b>Fig. 9</b> Principles of the proposed SL-PPM scheme .....	15
<b>Fig. 10</b> Comparison of waveform .....	17
<b>Fig. 11</b> Waveform of the proposed demodulation .....	19
<b>Fig. 12</b> Waveform of the transmitted signal .....	21
<b>Fig. 13</b> Bit error rate curve of different modulation methods .....	23
<b>Fig. 14</b> Average bandwidth requirements for different modulation .....	23
<b>Fig. 15</b> Bit error rate curve of the proposed SL-PPM according to the number of samples .....	24
<b>Fig. 16</b> Bit error rate curve of the proposed SL-PPM according to the demodulation .....	24
<b>Fig. 17</b> Block diagram for transmitter and receiver .....	25
<b>Fig. 18</b> (a) Measuring Kaolin powder, (b) Kaolin powder .....	27

Fig. 19 Experiment on water tank ..... 28  
Fig. 20 Received 4-PPM signal ..... 29  
Fig. 21 Received SL-PPM signal ..... 30





# A Study on Sloped Pulse Position Modulation Method in Underwater Laser Wireless Communication

Se-rim Kim

Department of Radio Communication Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

In underwater, an acoustic communication technology is mainly used because of the characteristics of water. However, the acoustic communication technology has several disadvantages. As a way to overcome these disadvantages, research on wireless communication using light has attracted attention. Absorption and scattering are important factors for channel characteristics in wireless optical communication. It is important to minimize absorption and scattering. Utilizes a low absorption window in the blue-green section of the electromagnetic spectrum to minimize the effect of absorption. The scattering is caused by various substances and particles that are dissolved in water rather than water itself. Turbidity is the most influential factor for scattering. So far, many studies have been conducted in an channel that does not consider turbidity, but in this thesis, experiments were conducted taking into consideration the turbidity of water in a tank. In addition, the underwater attenuation characteristics due to absorption and scattering are explained.

In wireless optical communication, the most commonly used methods are the pulse position modulation method and the on-off keying method. The pulse position modulation method can be variously modified to propose a modified pulse position modulation method having advantages. In this thesis, a new method using a sloped pulse instead of a conventional square pulse is proposed. Simulation results show that the proposed method and the conventional method are compared with each other in terms of bit error rate and bandwidth efficiency. From the viewpoint of bit error rate, the existing method was superior, but the proposed method was superior from the viewpoint of bandwidth efficiency.

**KEY WORDS** : Underwater laser wireless communication, absorption, scattering, turbidity, sloped pulse position modulation



# 수중 레이저 무선 통신에서 기울어진 펄스 위치 변조 기법에 관한 연구

김세림

Department of Radio Communication Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## 요약

수중에서는 매질의 특성 때문에 주로 음향통신기술을 사용한다. 하지만 음향통신기술은 여러 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완 할 수 있는 방법으로 광을 이용한 무선 통신의 연구가 각광받고 있다. 무선 광 통신을 할 때의 채널 특성으로 흡수와 산란이 중요한 요소이다. 흡수와 산란을 최소화 하는 것이 중요하다. 흡수의 영향을 최소화하기 위해 전자기 스펙트럼의 청록색 부분의 낮은 흡수 창을 활용한다. 산란 현상은 물 자체 보다 물속에 용해되어 있는 여러 물질과 입자에 의해 일어난다. 이때 산란에 많은 영향을 미치는 요소는 탁도이다. 지금까지 많은 연구들은 탁도를 고려하지 않은 환경에서 실험이 이루어졌지만 본 논문에서는 수조실험 시 물의 탁도를 고려하여 실험을 진행하였다. 또한 흡수와 산란에 따른 수중 감쇠 특성을 설명한다.

무선 광 통신을 할 때, 주로 쓰이는 방식은 펄스 위치 변조 방식과 온-오프 키잉 방식이다. 펄스 위치 변조 방식은 다양하게 변형하여 각각의 장점을 가진 변형된 펄스 위치 변조 방식이 있다. 본 논문에서는 기존의 사각 펄스를 이용한 방식이 아닌 기울어진 펄스를 이용한 새로운 방식을 제안하였다.

모의실험을 통해 기존의 방식과 제안된 방식을 비트 오류율 관점과 대역폭 효율 관점에서 성능을 비교 분석하였다. 비트 오류율 관점에서는 기존의 방식이 우수했지만 대역폭 효율 관점에서는 제안된 방식이 우수하였다.

**KEY WORDS** : 수중 레이저 무선 통신, 흡수, 산란, 탁도, 기울어진 펄스 위치 변조 방식



## 제 1 장 서 론

수중 활동의 증가로 수중 센서 네트워크, 원격 조종 수중 무인정, 자율 수중 차량부터 해양학 연구, 해저 조사와 같은 응용분야까지 높은 데이터 전송률과 낮은 오류율을 갖는 수중 무선 통신 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1]. 수중 무선 통신 시스템에서는 매질의 특성으로 인하여 음향기술이 가장 널리 사용되고 있다. 하지만 수중음향통신은 좁은 대역폭, 고비용, 높은 대기시간, 다중 경로 전달로 인한 인접 심볼간 간섭 문제와 도청에 의한 보안성 등과 같은 여러 가지 단점을 가지고 있다[2]. 이러한 단점을 해결할 수 있는 기술로 최근 수중 광 무선 통신이 대두되고 있다. 비록 수중에서 장거리 전송은 불가능 하지만 단거리 통신에서는 광 무선 통신이 많은 장점을 가진다. 특히, 수중에서 가시광선의 청록색 부분에 대한 낮은 흡수 특성을 이용하여, 효율적인 통신 시스템을 구현할 수 있다[3]. 광 무선 통신은 광섬유를 이용한 광 통신에서의 물리적인 연결이 필요하지 않아 다양한 응용분야에 사용될 수 있다. 수중 광 무선 통신에서는 레이저와 LED (Light Emitting Diode)가 널리 사용된다. 이 가운데 수중 LED 무선 통신 시스템은 광원의 넓은 확산 현상으로 인하여 레이저에 비해 짧은 거리에서 점 대 다중 점 방식으로 사용하지만 레이저에 비해 낮은 비용이 소요된다. 이와 비교하여 수중 레이저 무선 통신 시스템은 직진성이 강한 레이저의 특성을 이용하여 점 대 점 방식으로 전달되므로 도청에 의한 보안성 문제와 다중 경로 전달 문제를 야기하지 않는다.

수중 레이저 무선 통신 방식으로써 최근에는 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 이나 OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) 방식도 연구되고 있지만 주로 구현이 쉽고, 저비용의 장점을 가진 IM/DD (Intensity Modulation / Direct Detection) 방식인 온-오프 키잉 방식(On-Off Keying : OOK)과 펄스 위치 변조 방식(Pulse Position Modulation : PPM) 등이 전통적으로 많이 사용된다[4,5]. 또한 펄스 위치 변조 방식에 기반하는 변형된 방식이 많이 등장하였는데 펄스 간격 변조 방식(Pulse Interval Modulation : PIM)도 펄스 위치 변조 방식의 변형된 한 예이다[6]. Oubei 등은 온-오프 키잉 방식과 광

원과 검출기로서 LD(Laser Diode), 520 nm, Si-APD (Silicon-Avalanche Photo Diode)를 사용하여 전송률 1.5 Gbps 에서 오류율  $10^{-9}$ 을 달성하였다[1]. 이때 전송 거리는 7 m, 출력은 15 mW 였다. Baghdady 등은 온-오프 키잉 방식과 광원과 검출기는 LD, 445 nm, Si-APD를 사용하여 전송률 3 Gbps에서 오류율  $10^{-4}$ 을 달성하였으며, 이때 전송거리는 2.96 m, 출력은 15 mW였다[7]. 또한 Wu 등은 변조 방식으로써 16-QAM-OFDM을 사용하고, 광원과 검출기는 450 nm LD와 PIN-PD (Positive-Intrinsic-Negative Photo Diode)를 사용하여 전송률 4 Gbps 으로 오류율  $10^{-3}$  을 달성하였는데 전송 거리는 10.2 m, 출력은 45 mW였다[8]. Meihong 등은 펄스 위치 변조 방식의 성능을 모의실험을 통해 분석하였는데 이 때 기존의 펄스 위치 변조 방식의 성능을 보완할 수 있는 방식을 제안하고, 기존의 방식과 함께 비교 분석하였다[9]. 이와 같이 펄스 위치 변조 방식의 모의실험에 대한 연구는 많지만 실제 실험에 관한 연구는 미미하다. 따라서 온-오프 키잉 방식보다 잡음 환경에서의 성능이 더 뛰어난 펄스 위치 변조 방식에 대한 실질적인 실험이 필요하다.

펄스의 위치나 간격 등 여러 변수들을 이용하여 더 많은 정보를 효율적으로 전송하는 것이 중요하다. 이에 본 논문에서는 펄스의 위치와 펄스의 기울기를 동시에 이용하여 정보를 전달하는 방식인 SL-PPM (SLoped-PPM) 방식을 제안하고, 기존의 방식과 제안한 방식의 성능을 모의실험과 수조실험을 통해 분석하였다. 수행된 수조실험에서 송신부에는 파장이 520 nm인 녹색 레이저 다이오드를 사용하였으며, 수신부에는 포토다이오드를 사용하였다.

최근 수중 레이저 무선 통신은 활발한 연구가 이루어지고 있지만 지금까지 대부분의 연구들은 탁도가 존재하지 않는 순수한 물에서 이루어졌다. 실제 통신이 이루어지는 해양 환경은 탁도가 존재한다. 따라서 탁도에 따른 통신 성능의 연구가 필요하다. 수중에서 광을 이용한 통신을 할 때, 가장 중요한 요소는 물에 의한 광 신호의 감쇄이다[10]. 레이저와 같은 저 발산의 평행 광에 대해서 감쇄는 물 자체에 의한 감쇄보다는 물에 포함되어 있는 여러 가지 입자와 용해 물질에 의한 흡수와 산란에 의해 발생한다. 흡수는 물 분자 및 입자가 상호 작용하는 동안 에너지의 전달로 인해 광자 에너지가 손실되는 과정이며, 산란

은 광자가 물속의 미립자 물질과 상호 작용 후 초기의 경로에서 멀리 분산되는 과정이다. 흡수에 의한 감쇄는 전자기 스펙트럼에서 낮은 흡수 창에 해당하는 파장을 활용하여 최소화 할 수 있다. 산란에 의한 감쇄는 물의 탁도에 영향을 많이 받는다. 지금까지 수중 무선 광 통신에 관한 연구들은 거의 탁도가 없는 깨끗한 수중 환경에서 진행되었지만 실제 환경은 다양한 탁도가 있으며 이에 의한 산란이 존재한다. 본 논문에서는 수조실험을 통해 탁도에 따라 수중에서 레이저 신호가 전달될 때의 성능을 분석하였다. 탁도 조절을 위해 카울린 가루를 사용하였으며, 통신 방식에 따른 성능을 비교하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 수중 광 채널 특성과 광 소자에 대해 기술하며, 3장에서는 통신을 위한 신호 전송 방식과 제안된 방식에 대해 기술한다. 4장에서는 모의실험과 수조실험 과정과 결과에 대해 기술하고, 마지막 5장에서 결론을 서술한다.



## 제 2 장 수중 광 채널 특성과 광 소자

### 2.1 수중 광 채널 전달 특성

수중 광 채널은 물의 기본적인 특성의 이해에서 시작된다. 특히 광 통신의 매체로 해수를 이용할 때의 정보는 많지 않다. 성공적인 수중 무선 광통신을 위해서는 물의 물리적인 특성을 이해하는 것이 중요하다. 수중에서 광이 전달될 때 많은 요인들에 의해 영향을 받는다. 수중 광 채널에는 흡수와 산란, 다중 경로 간섭 및 분산, 수중요동, 배경잡음, 추적 및 물리적 방해물 등이 존재한다 [11]. 적외선이나 LED와 같은 스펙트럼 선폰이 넓은 장비에서는 다중 경로에 의한 문제가 야기될 수 있지만 직진성이 강한 레이저를 이용한 광통신의 경우 다중 경로에 의한 문제점을 거의 야기하지 않는다. 또한 고유의 광학 특성과 겉보기 광학 특성으로 분류된다. 고유의 광학 특성은 광원의 특성과 무관한 매체인 물 자체의 특성함수이다. 겉보기 광학 특성은 확산과 평행에 따른 광 필드의 속성을 포함한다. 고유의 광학 특성은 흡수와 산란을 통한 수중의 감쇠를 포함한다.

흡수와 산란은 수중 레이저 통신에서 가장 많은 영향을 미치는 요인이다. 물의 흡수 계수는 광 신호의 감쇠에 기여하는데 감쇠의 원인은 무기 및 유기 물질의 원인으로 나눈다. 무기 물질의 고유적인 흡수는 물 분자의 흡수, 용해된 물질에 의한 흡수로 구성되며, 유기 물질의 흡수는 식물성 플랑크톤의 엽록소의 흡수, CDOM(Colored Dissolved Organic Matter)의 흡수로 구성된다. 그림 1은 파장에 따른 흡수계수를 나타낸 그림이다. 광 파장이 증가할수록, 흡수는 증가한다. 또한 파장이 감소할수록 용해물질의 흡수특성 때문에 흡수가 증가한다. 따라서 그림 1에서 보이는 것처럼 순수한 물의 경우 가장 낮은 흡수대역은 청색과 녹색 대역의 파장이다. 그림 2는 탁도에 따른 물의 유형별 플랑크톤에 의한 흡수계수를 나타낸 그림이다. 그림 2에서 보이는 것처럼 물의 탁도가 증가함에 따라 흡수 창은 녹색에서 황색으로 이동한다. 산란은 광자가 입자와 충돌로 인해 주변으로 흩어지는 현상이다. 광자는 광의 파장보다 큰 입자와 작용하



여 미(Mie) 산란을 겪는다. 또한 광자의 입자의 크기가 파장에 비해 작은 분자에 의한 레일리(Rayleigh) 산란을 겪는다. 이러한 산란은 물의 탁도와 영향이 깊는데 물의 고유적인 산란보다 용해된 물질과 부유물에 의한 산란이 더 크다 [12]. 그림 3은 수중 채널에서 흡수와 산란의 개념도이다.

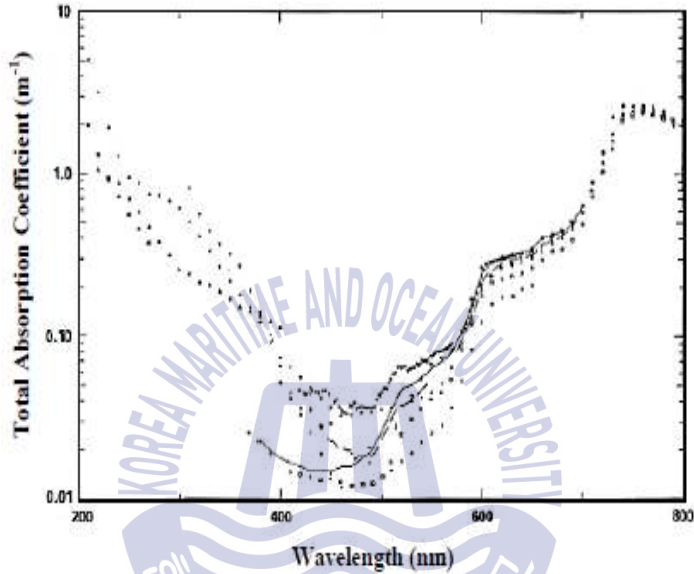


Fig.1 Absorption of pure seawater as a function of wavelength as given by various authors [12]

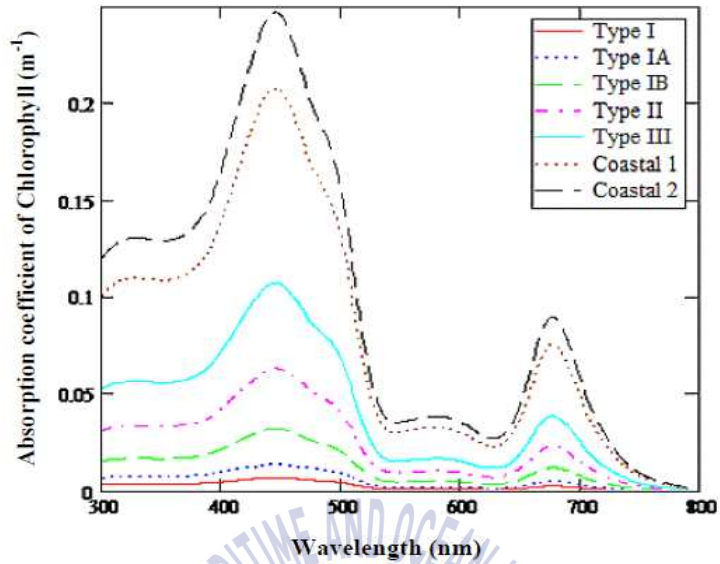


Fig.2 Absorption coefficient of phytoplankton shown for different Jerlov water types [12]

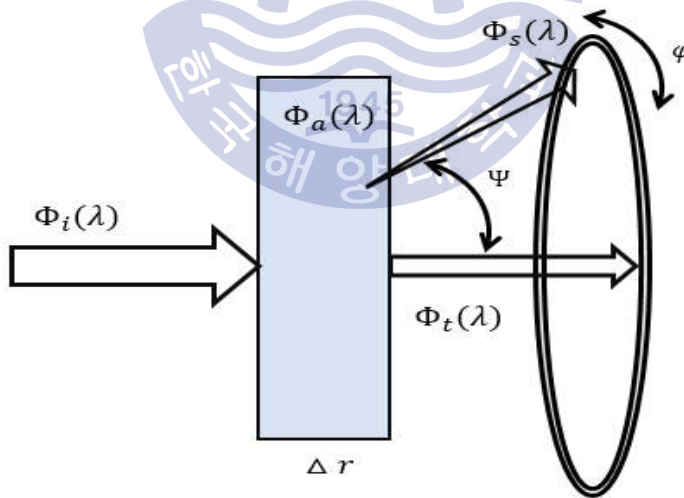


Fig.3 Absorption and scattering in underwater channels

## 2.2 광원 및 광 검출기

광 통신에서는 광원과 광 검출기가 중요한 역할을 한다. 광원은 발광 소자로써 전기적인 신호를 광 신호로 변환시키는 소자이다. 특히 광 통신용 광원은 주로 반도체 광원을 사용하는데 반도체 광원은 크기가 작고, 효율이 좋으며, 수명이 길고, 신뢰성이 우수하다. 또한 작은 발광 범위를 가지고 있고 스펙트럼 선폭이 좁으며, 고속 변조가 가능하다. 반도체 광원의 종류에는 LED와 레이저 다이오드가 있다. 다음의 Table 1에는 LED와 레이저 다이오드의 특성을 비교한 것을 나타내었다. LED는 최소 출력 빔 발산 각이 넓어 점 대 다중 점 방식을 이용하는 통신이 가능하다. 따라서 정교한 정렬을 요구하지 않는다. 저비용이며, 구현이 쉽고, 유효수명이 긴 장점을 가지고 있다. 하지만 고속, 장거리 통신에는 적합하지 않다. LD는 광 출력이 높기 때문에 고속, 장거리 통신이 가능하다. 또한 최소 출력 빔 발산 각을 정교하게 조정할 수 있어 점 대 점 방식의 통신이 가능하다. 따라서 다중경로 문제를 야기하지 않는다. 하지만 LED에 비해 고비용이며, 구현이 까다롭다. 원하는 통신 방식과 목적에 따라 LED와 LD의 특성을 이해하고 시스템을 구현하여야 한다.

**Table 1** Comparison of LED and Laser Diode(LD)

	LED	LD
발광방식	자연방출	유도방출
위상	Noncoherent	Coherent
결합효율	낮다	높다
광 출력	낮다	높다
유효수명	길다	짧다
비용	낮다	높다
용도	저속, 단거리	고속, 장거리
최소 출력 빔 발산	~0.5 degrees	milli radians 가능, ~0.01 degrees
온도의존	둔감	민감
수신기 필터링	넓음	좁음
정렬방식	점 대 다중 점	점 대 점

광 검출기는 광원의 반대로 광 에너지를 검출하여 전기적인 신호로 바꾸는 소자이다. 광 검출에는 여러 방법이 있지만, 광 통신에서는 주로 광자 검출 방법을 사용한다. 종류로는 광 전자 방출형, 광 기전력형, 광 도전형 등이 존재한다. 광전자 방출형은 빛 입사에 의해 진공관에서 광자가 표적에 충돌하여 전자 방출 효과를 이용하는 방법을 사용한다. 종류로는 광전관(Photoelectric Tube), 광전자증배관(Photo Multiplier Tube : PMT)이 있다. 광전자증배관은 매우 낮은

광출력에서도 우수한 신호 대 잡음비를 갖지만 크기가 비교적 크고, 고 비용이며, 검출 능력이 좋지만 민감하여 다루기가 까다롭다[13]. 그래서 보통 광 무선 통신에서는 광 기전력형의 PIN-PD와 APD를 많이 사용한다. PIN-PD는 PIN 접합을 갖는 광 검출용 다이오드를 의미하는데 PIN-PD의 특징은 고속 동작이 가능하고, 안정적이며, 신뢰성이 높고 저비용이며 가장 기본적인 선형 소자이다. APD는 빛을 전기적 에너지로 변환시켜주는 광통신용 수광 소자의 일종으로 광 증배 효과에 의한 높은 이득을 가지는 소자이다. APD의 특징은 온도 변화에 민감하며 고비용이고 높은 역 바이어스 전압이 필요하다. 하지만 큰 광류를 얻을 수 있고, 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있어 고속 전송에 많이 이용된다. 높은 광전 변환 효율을 가지고 있어 고 전계 영역을 형성하여 이 영역에서 큰 내부 이득이 발생하게 된다.



## 제 3 장 레이저 기반 수중 통신을 위한 신호 전송

### 3.1 기존의 신호 전송 방법

주로 레이저 기반의 수중 통신에서는 복잡도를 줄이고 단순화를 위해 IM/DD 방식을 사용한다[14]. IM/DD 방식은 드라이버를 사용하여 전압의 변화에 따라 전류가 변화하도록 한다. 그리고 구동 전류 크기에 광세기가 직접 비례하도록 변조되고 수신 광 신호세기에 직접 비례되는 전류의 크기로 검출하는 방식으로 구현이 쉽고 저 비용이다. 주요 방법으로는 온-오프 키잉 방식과 펄스 위치 변조 방식, 펄스 간격 변조 방식 등이 있다[15].

#### 3.1.1 온-오프 키잉 방식

온-오프 키잉 방식은 가장 간단한 신호 전송 방법으로써 진폭 편이 변조 방식의 일종이다. 이진 진폭 편이 변조 방식의 다른 명칭이기도 하다. 반송파를 '1' 과 '0' 으로 켜다 끄다 하면서 정보를 전송하는 방식이다. 이 방식에는 제로 복귀 기록(Return-to-zero : RZ)과 비 복귀 기록 (Non-return-to-zero : NRZ)이 있다. 제로 복귀 기록방식은 펄스가 부분적으로만 지속된다. 그림 4는 온-오프 키잉 방식의 파형 예로써 제로 복귀 기록 방식과 비 복귀 기록 방식을 보여준다. 듀티(duty) 사이클은  $\gamma=0.5$  이고,  $A$ 는 평균 전송 전력을 나타낸다. 비 복귀 기록 방식은 비트 지속 기간과 동일한 지속 시간을 갖는 펄스가 전송된다. 온-오프 키잉 비 복귀 기록 방식의 송신 펄스는 다음과 같다.

$$p(t) = \begin{cases} 2P_r & \text{for } t \in [0, T_b) \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3-1)$$

이때,  $P_r$ 은 평균 전력,  $T_b$ 는 비트 지속 기간을 나타낸다.

온-오프 키잉 방식은 구현이 쉽다는 장점을 가지고 있지만 잡음에 약하며,

심볼 구분을 위한 적절한 문턱치를 설정해야 된다는 단점을 가지고 있다[15]. 또한 탁도가 높은 혼탁한 해수와 연안 해역에서는 다중 산란 효과로 인해 오류를 크게 증가시킨다.

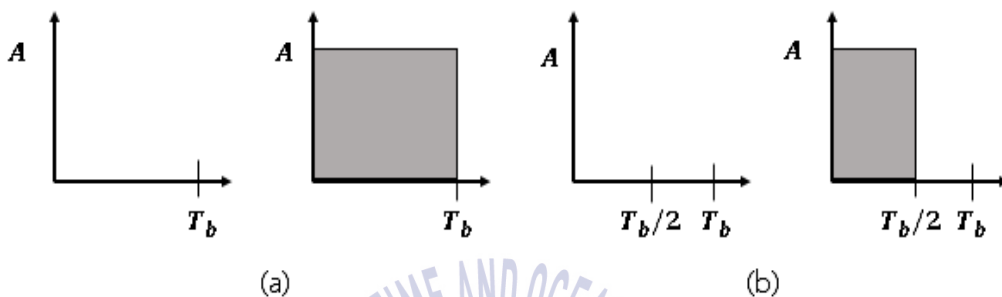


Fig.4 Waveform for OOK, (a) NRZ, (b) RZ

### 3.1.2 펄스 위치 변조 방식

펄스 위치 변조 방식은 입력 신호의 진폭에 따라 펄스의 시간적 위치를 변화시키는 펄스 변조 방식으로써 직교 변조 방식이다. 시간 지연이 가능한 펄스  $2^M$ 개 중 하나의 펄스를 전송함으로써 정보 비트 M이 매핑된다. 시간 간격은  $T_s$ 로  $L=2^M$ 의 프레임으로 구성된다. 입력 비트들은 심볼 내의 전체 M개의 구간에서 M-1개의 ‘0’ 칩과 1개의 ‘1’ 칩으로 매핑된다. 송신 펄스는 다음과 같다.

$$p(t)_{PPM} = \begin{cases} 1 & \text{for } t \in [(m-1)T_s, mT_s] \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3-2)$$

이때  $m \in 1, 2, \dots, L$  이다. 그림 5는 펄스 위치 변조 방식의 파형을 보여준다.

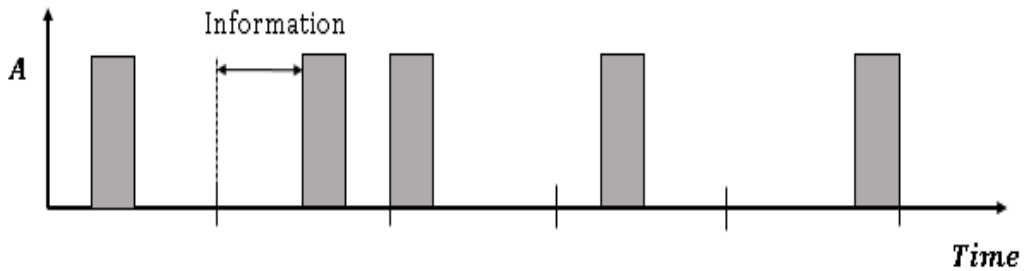


Fig.5 Waveform of PPM for  $L=4$

### 3.1.3 변형된 펄스 위치 변조 방식

펄스 위치 변조 방식에는 차등 펄스 위치 변조 방식, 다중 레벨 펄스 위치 변조 방식, 차등 진폭 펄스 위치 변조 등과 같이 여러 변형된 형태들이 있다.

차등 펄스 위치 변조 방식(Differential Pulse Position Modulation : DPPM)은 펄스 위치 변조 방식에서 펄스 뒤의 모든 빈 슬롯을 제거한 방식이다.  $M=\log_2 L$ 인 입력 비트의 블록은 다음과 같이 정의된  $L$ 개의 개별 차등 펄스 위치 변조 파형 중 하나에 매핑된다. 따라서 펄스 시퀀스는 다음과 같다.

$$p(t)_{DPPM} = P_p \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k r(t - kT_s) \quad (3-3)$$

이때,  $c_k \in \{0,1\}$ ,  $P_p$ 는 피크 전송 전력,  $r(t)$ 는 하나의 시간 슬롯 지속 시간을 가지는 단위 진폭 사각 펄스를 나타낸다. 그림 6은 차등 펄스 위치 변조 방식의 파형을 보여준다. 이 방식은 특정 범위의 물리적 매개 변수에 대해 펄스 위치 변조 방식보다 높은 속도로 차단 주파수를 달성하고, 평균 비트 전송률 및 대역폭이 고정된 경우 펄스 위치 변조 방식보다 평균 전력 효율이 향상된



다. 하지만 동일한 지속시간을 가지지 않아 복잡성과 문제점을 야기하며, 단일 칩의 오류는 해당 칩과 다음 비트까지 손상을 준다[17].

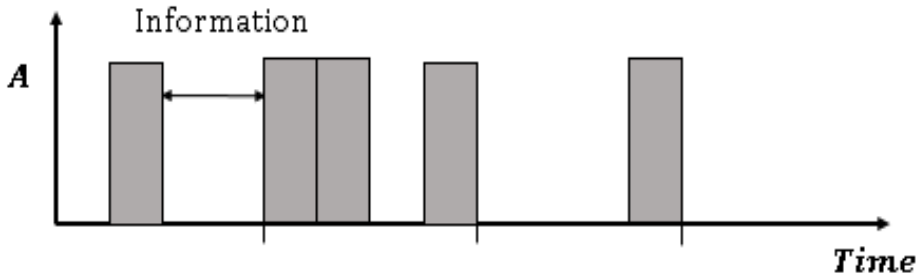


Fig.6 Waveform of DPPM

다중 레벨 펄스 위치 변조 방식(Multi-level Pulse Position Modulation : MPPM)은 지속시간  $T = T_b \log_2 L$  인 각각의 심볼은  $n$ 개의 슬롯으로 분할되며, 슬롯은  $T/n$ 의 지속시간을 가진다. 펄스가  $w$ 개의 슬롯으로 전송하며,  $\binom{n}{w}$ 개의 가능한 심볼을 제공한다. 모든 심볼을 사용하지 않고 해밍 거리가 최소값인 심볼을 선택하여 사용한다. 그림 7은  $n$ 이 4,  $w$ 가 2일 때 다중 레벨 펄스 위치 변조 방식의 파형을 보여준다. 이는 기존의 방식보다 더 높은 대역폭 효율을 제공하며, 심볼 간 간섭이 심한 채널에서는 기존의 방식보다 전력 효율이 더 우수하다.

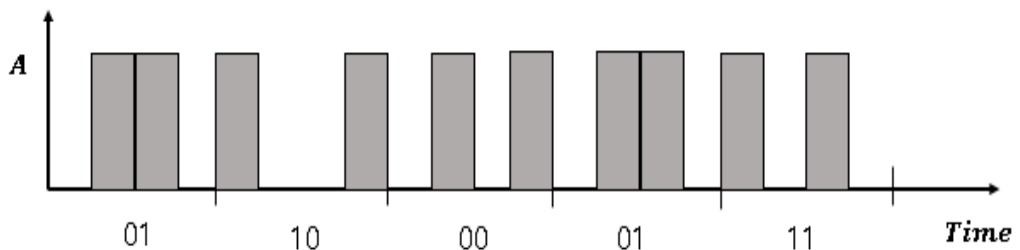


Fig.7 Waveform of MPPM for  $\binom{4}{2}$

차등 진폭 펄스 위치 변조 방식(Differential Amplitude Pulse-Position Modulation : DAPPM)은 펄스 위치 변조방식과 펄스 진폭 변조 방식의 조합이다.  $M = \log_2(A \times L)$ 인 입력 비트의 블록은  $2^M$ 개의 파형 중에 하나에 매핑되며, 각각의 진폭은  $\{1, \dots, A\}$ 에서 선택되는 칩을 갖는다. 심볼의 길이는  $\{1, \dots, L\}$ 에서 다양하게 선택된다. 따라서 펄스 시퀀스는 다음과 같다.

$$p(t)_{DAPPM} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k \left( \frac{P_p}{A} \right) r(t - kT_S) \quad (3-4)$$

이때,  $b_k \in \{0, 1, \dots, A\}$ 이고,  $P_p$ 는 피크 전송 전력,  $r(t)$ 는 하나의 시간 슬롯 지속 시간을 가지는 단위 진폭 사각 펄스를 나타낸다. 그림 8은 A가 2, L이 2일 때 차등 진폭 펄스 위치 변조 방식의 파형을 보여준다. 이 방식은 데이터 처리량, 대역폭 용량, 피크 대 평균 전력비를 향상시킨다. 심볼 길이와 펄스 진폭은 입력 데이터에 따라 변조된다.

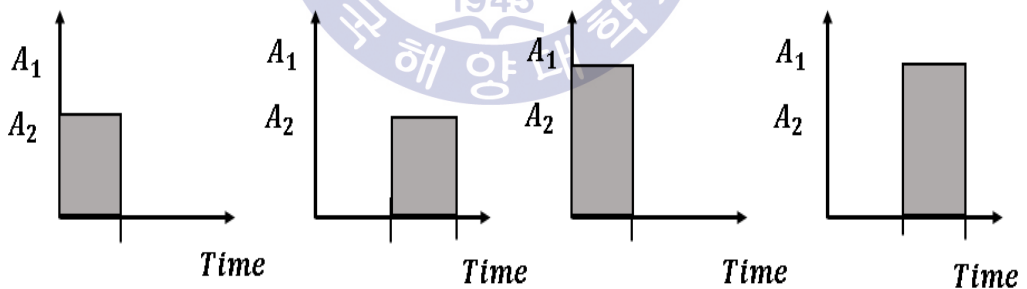


Fig.8 Waveform of DAPPM for A=2, L=2

### 3.2 기울어진 펄스 위치 변조 방식 제안

본 논문에서는 기울어진 펄스를 이용하는 새로운 펄스 위치 변조 방식인 SL-PPM 방식을 제안한다. 기존의 방식은 비트의 정보를 펄스의 위치 정보에 따라 매핑한다. 이에 비해 제안된 방식은 기울어진 펄스를 사용하여 기울기와 펄스 위치정보 두 가지를 사용하여 비트의 정보를 매핑한다. 제안된 방식은 펄스 기울기 변조 방식(Pulse Slope Modulation : PSM)[18]과 펄스 위치 변조 방식을 결합한 방식으로써 지금까지 펄스 기울기 변조 방식은 한가지의 기울기를 가지는 펄스를 사용하거나, 단순하게 온-오프 키잉 방식을 결합하는 방식[19]으로 구성되었다. 하지만 본 논문에서는 두 가지의 기울기를 모두 이용하면서 펄스 위치 변조 방식을 결합한 방식을 제안하였다. 다음의 그림 9는 제안한 방식의 블록도를 보여준다.

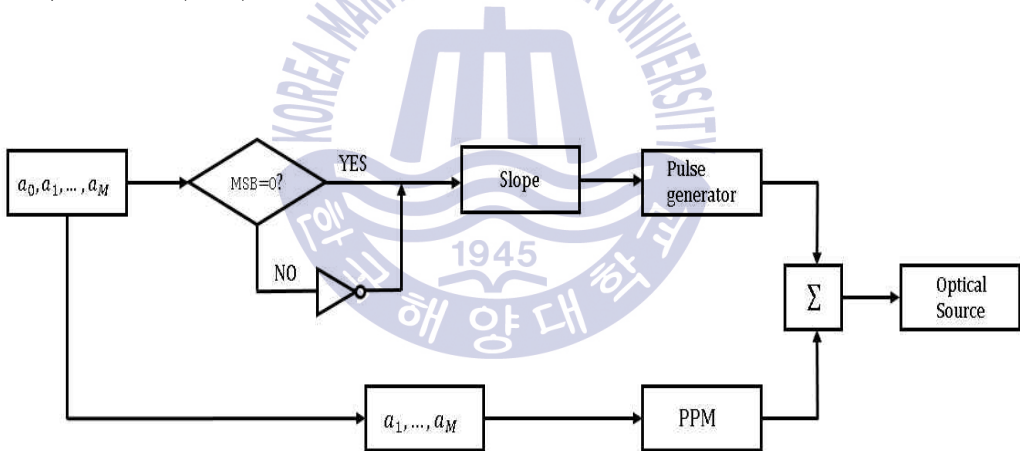


Fig.9 Principles of the proposed SL-PPM scheme

최상위 비트(Most Significant Bit : MSB)에 따라 기울기의 부호를 정한다. 시간 간격이  $T_s$ , 진폭은  $A$  일 때, 입력 비트가 0 인 경우 기울기는  $s = \frac{A}{2T_s}$  이고,

1 인 경우 기울기는  $s = -\frac{A}{2T_s}$  이다. 기울기의 부호가 정해지면, 최상위 비트를 제외한 나머지 비트로 펄스 위치 변조 방식을 사용하여 펄스의 위치 정보를 정한다. 따라서 펄스 파형은 다음과 같다.

$$p(t)_{SL\_PPM} = \begin{cases} st & \text{for } t \in [(m-1)T_s, mT_s] \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3-5)$$

이때  $m \in 1, 2, \dots, L$  이다.

심볼 길이를 동일하게 하는 방법과 펄스 지속시간을 동일하게 하는 두 가지 방법으로 신호를 만들 수 있다. 그림 10은 기존의 펄스 위치 변조 방식과 제안된 방식에서의 파형의 예를 보여준다. 같은 심볼 길이를 갖는다면 제안된 방식의 펄스 지속 시간은 기울기를 구분하여 1개의 비트를 더 전송할 수 있으므로 기존의 방식보다 길어진다. 이는 동일한 전력 효율을 유지하면서 광의 지속시간을 늘릴 수 있게 되는 것이다. 따라서 광의 지속시간이 짧아질수록 레이저의 민감한 동작 속도를 필요하게 된다는 점을 감안하면 제안된 방식은 기존의 방식보다 레이저 동작 속도에 민감하지 않다. 그리고 같은 펄스 지속 시간을 갖는다면 제안된 방식은 전체 신호의 길이가 두 배로 줄어들게 되므로 데이터 전송 속도가 기존의 방식의 두 배가 된다. 기존의 방식은 M개의 펄스로  $\log_2 M$ 개의 비트를 보낼 수 있다. 비트 지속시간은  $T_{bit}$ , 펄스 지속시간은  $T_{pulse}$ , 평균 듀티 주기를  $\gamma = \frac{1}{N}$  라고 하면 대역폭 효율( $\eta_B$ )과 전력 효율( $\eta_P$ )은 다음과 같이 표현할 수 있다[20].

$$\eta_B = \frac{\log_2 N}{N} \quad (3-6)$$

$$\eta_P = \frac{\eta_B}{\gamma} = \log_2 N \quad (3-7)$$

이에 비해 제안된 방식은 M개의 펄스로  $(\log_2 M) + 1$ 개의 비트를 보낼 수 있으므로 대역폭 효율( $\eta_B$ )과 전력 효율( $\eta_P$ )은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_B = \frac{2\log_2 N}{N} \quad (3-8)$$

$$\eta_P = \frac{\eta_B}{\gamma} = 2\log_2 N \quad (3-9)$$

이처럼 같은 펄스 지속 시간을 갖는 경우 제안한 방식은 기존의 방식보다 대역폭 효율과 전력 효율이 증가한다.

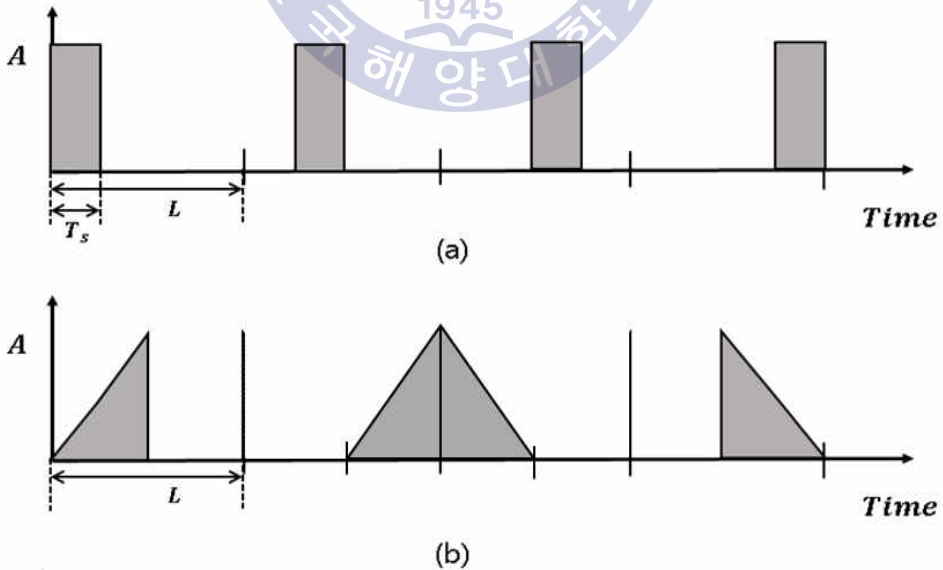


Fig.10 Comparison of waveform, (a) 4-PPM, (b) SL-PPM.

송신 단에서는 그림 10-(b)와 같은 파형으로 변조된 신호를 전송하게 되며, 수신 단에서 제안된 복조 방식으로는 크게 두 가지를 사용할 수 있다. 이는 심볼 탐지를 위해 기울기 정보를 찾는 방식으로써 두 점 또는 다중 점을 이용하여 기울기를 구하는 방식과 일반적인 정합 필터를 이용하는 방식이 있다. 그림 11은 두 점을 이용한 복조 방식을 파형으로 보여준다. 송신 신호  $p(t)_{SL\_PPM}$ 이 APD 출력 신호를  $sr(t)$ 라 하자. 먼저 펄스의 지속 시간인  $T_s$ 간격으로 평균  $\overline{sr(t)}$ 을 구한 뒤  $\overline{sr(t)}$ 에서 MSB를 제외한 나머지 비트를 판별한다.  $\overline{sr(t)}$ 에서 더 큰 값을 나타내는  $t$ 구간에서  $t_{r1}, t_{r2}$ 을 불규칙하게 선택한다. 이때, 불규칙한 선택을 하는 이유는 기울어진 펄스 특징상 처음 부분과 끝 부분의 차이가 가장 크지만 레이저의 동작 특성상 처음 부분과 끝 부분은 불안정할 수 있으며, 예기치 못한 잡음의 영향을 받을 수 있기 때문이다. MSB는 두 점으로 기울기를 비교하여 얻게 된다. 식 (3-10)은 두 점을 사용할 때의 복조를 나타낸다.

$$MSB(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } sr(t_{r1}) - sr(t_{r2}) > 0 \\ 0 & \text{if } sr(t_{r1}) - sr(t_{r2}) < 0 \end{cases} \quad (3-10)$$

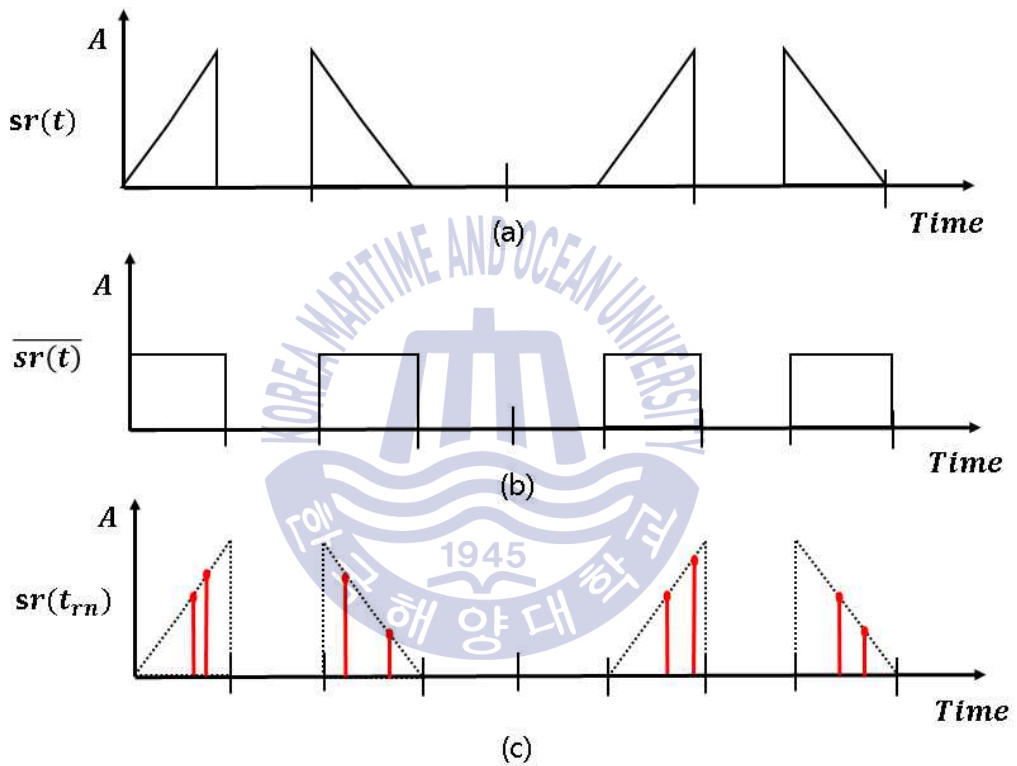
다중점을 사용할 때는, 점의 개수에 따라 부호를 판별할 때 짝수와 홀수로 나누어 생각해야 된다. 식 (3-11)은  $n$ 이 홀수일 때, 식 (3-12)는  $n$ 이 짝수일 때를 나타낸다.

$$Bit(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } (sr(t_{r1}) - sr(t_{r2})) \cdots (sr(t_{rn-1}) - sr(t_{rn})) > 0 \\ 0 & \text{if } (sr(t_{r1}) - sr(t_{r2})) \cdots (sr(t_{rn-1}) - sr(t_{rn})) < 0 \end{cases} \quad (3-11)$$

$$Bit(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } (sr(t_{r1}) - sr(t_{r2})) \cdots (sr(t_{rn-1}) - sr(t_{rn})) \cdot (sr(t_{r1}) - sr(t_{rn})) > 0 \\ 0 & \text{if } (sr(t_{r1}) - sr(t_{r2})) \cdots (sr(t_{rn-1}) - sr(t_{rn})) \cdot (sr(t_{r1}) - sr(t_{rn})) < 0 \end{cases}$$

(3-12)

두 점을 이용하는 방식이 가장 구현이 쉬운 방식이지만 확률적으로 복조의 안정성은 가장 낮다. 4장에서 모의실험과 수조실험을 통해 기존의 방식과 제안된 방식을 비교하며, 복조 방식에 따라 성능을 상황에 따라 어떤 복조 방식이 우수할지 비교·분석한다.



**Fig.11** Waveform of the proposed demodulation, (a) Received signal, (b) Average of the received signal, (c) Point detection demodulation

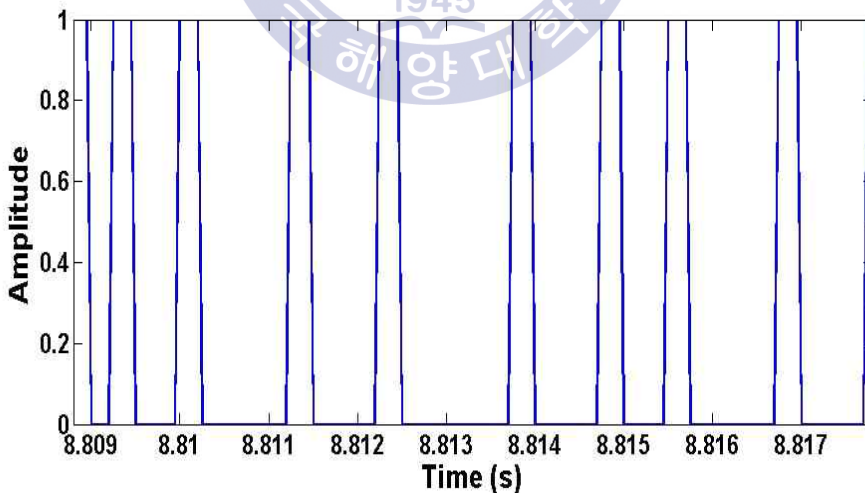
## 제 4 장 모의 및 수조 실험 결과

### 4.1 모의실험 및 결과분석

#### 4.1.1 실험 설계

신호 전송 방식은 기존의 펄스 위치 변조 방식인 4-PPM과 제안된 방식 두 가지로 하였으며, 심볼 길이를 기준으로 하는 방식과 펄스 길이를 기준으로 하는 방식 두 가지를 비교하였다. AWGN 채널에서 3 dB 간격으로 모의실험을 하였으며, 제안된 방식에서는 복조방식으로써 두 점 또는 다중 점을 사용하는 방식과 정합 필터를 사용하는 방식을 모두 적용하여 서로 비교하였다.

그림 12는 잡음이 없는 경우 각 변조 방식에 따른 수신 신호를 보여준다. 이때 두 신호의 심볼 길이는 같다.



(a)



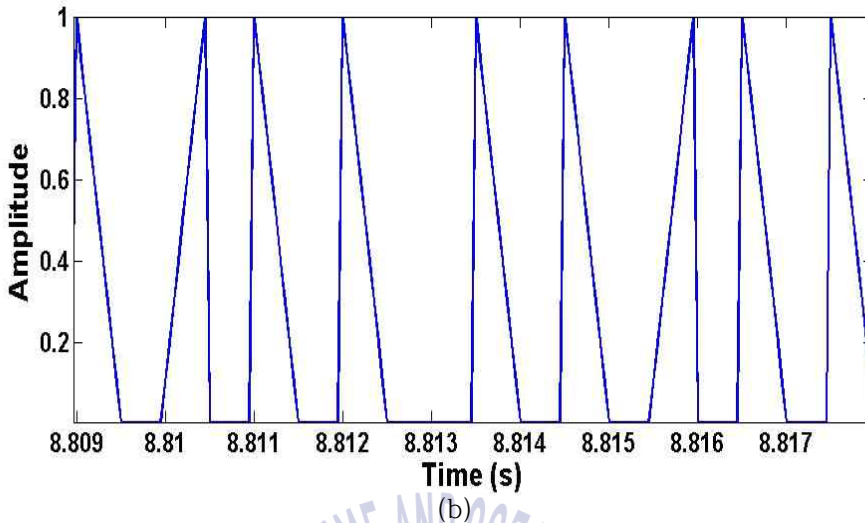


Fig.12 Waveform of the transmitted signal

(a) 4-PPM, (b) SL-PPM

#### 4.1.2 실험결과

기존의 방식과 제안된 방식을 여러 기준으로 나누어 비트 오류율 관점에서 나타내었다. 그림 13에서 PPM은 기존의 방식을 나타내고, SL-PPM(1)은 제안한 방식에서 심볼 길이가 기준이고, SL-PPM(2)는 펄스 길이를 기준으로 한 방식을 나타낸다. 비트 오류율 관점으로 볼 때, 펄스 위치 변조 방식이 가장 나은 성능을 보였다. 그리고 심볼 길이를 기준으로 하는 방식보다 펄스 길이를 기준으로 하는 방식이 더 성능이 좋다. 그림 14는 대표적인 변조 방식에 따른 평균 대역폭 요구량을 비교한 그림이다. 입력 비트  $M$ 이 증가할수록 기존의 방식과 제안된 방식의 차이는 커진다. 대역폭 요구량 관점에서 제안된 방식이 기존의 방식보다 우수하다. 비트 오류율 관점에서는 펄스 위치 변조 방식이 좋지만, 대역폭 효율과 전력 효율 관점에서는 펄스 길이를 기준으로 하는 제안된 방식의 성능이 우수하다. 레이저 통신 장비 특성상 샘플링의 수에 제한이 엄격한 경우가 존재한다. 그래서 그림 15는 심볼 길이를 기준으로 하는 제안된 방식에서 각 샘플링 개수와 복조 부분에서 점의 개수에 따라 비트 오류율 관점에서 성능을

분석한 것을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 샘플링의 개수가 적어질수록 성능이 우수하고, 점의 개수가 적을수록 성능이 우수하다.

복조 방식에는 점을 이용하는 방식과 정합 필터는 이용하는 방식 두 가지가 있다. 그림 16은 점을 이용하는 방식 중 가장 우수한 두 점을 이용하는 방식과 정합 필터를 이용하는 방식의 비트 오류율 관점의 성능을 보여준다. 점을 이용하는 방식보다 정합필터는 사용하는 방식이 성능이 더 좋게 나타난다. 하지만 샘플 수가 적어질수록 그 차이는 점점 줄어드는 것을 알 수 있다. 모의실험 프로그램 상에서 계산 시간을 비교하여 보니 정합 필터를 이용하는 방식은 점을 이용하는 방식보다 20.26배 더 소요되었다. 샘플수가 적을 때에는 두 방식의 비트 오류율 차이가 크지 않기 때문에 계산 시간의 성능이 좋은 점을 이용하는 방식을 사용하는 것이 시스템에 이득이다.

모의실험 결과를 보면, 수신 오류율 성능 관점에서는 제안된 방식보다 기존의 방식이 우수하지만, 대역폭 효율과 전력 효율 관점에서는 제안된 방식이 우수하다. 또한 제안된 방식을 사용할 때는 샘플 수가 적은 경우 정합필터 사용보다 점을 이용한 복조 방식을 사용하는 것이 바람직하다. 제안된 방식은 변조 과정에서 기준점을 두 가지로 잡을 수 있으며, 복조 방식에서도 점을 이용하는 방식과 정합 필터를 이용하는 방식을 선택하여 사용할 수 있다. 이처럼 여러 방식으로 구현할 수 있어 다양한 환경과 시스템 장비에 적용하기가 용이하다.

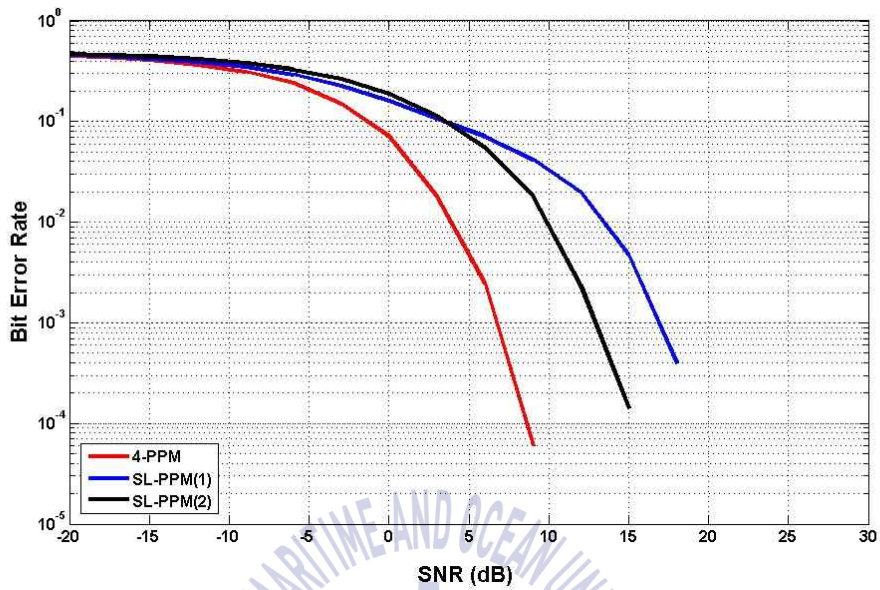


Fig.13 Bit error rate curve of different modulation methods

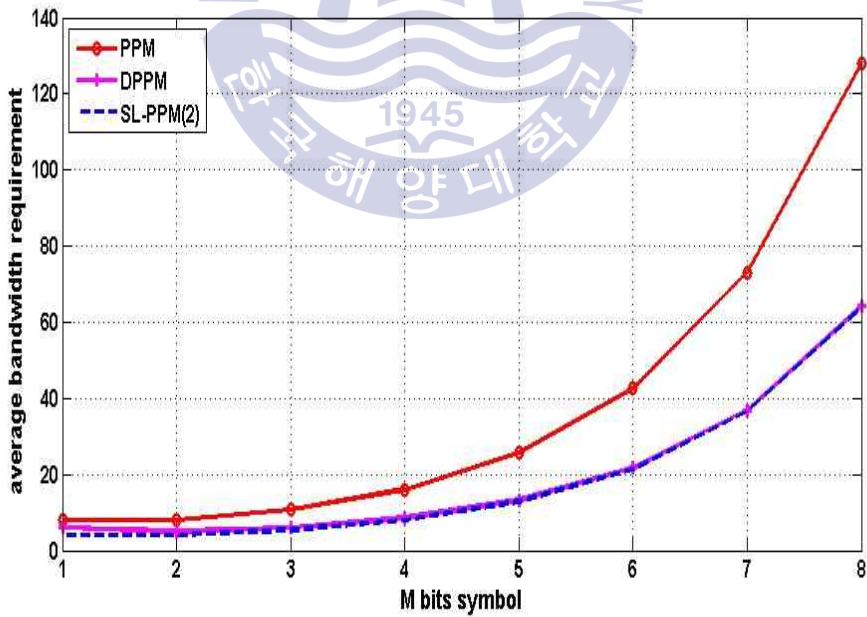


Fig.14 Average bandwidth requirements for different modulation

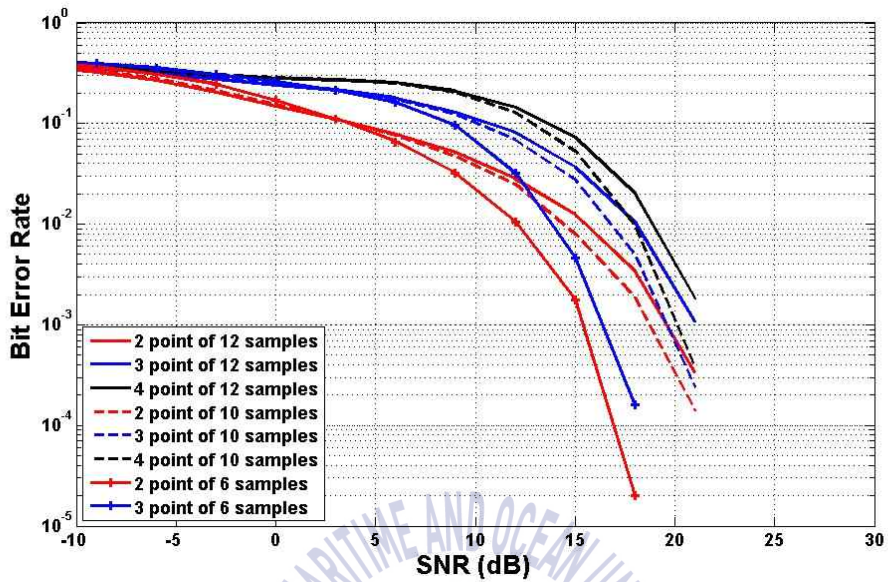


Fig.15 Bit error rate curve of the proposed SL-PPM according to the number of samples

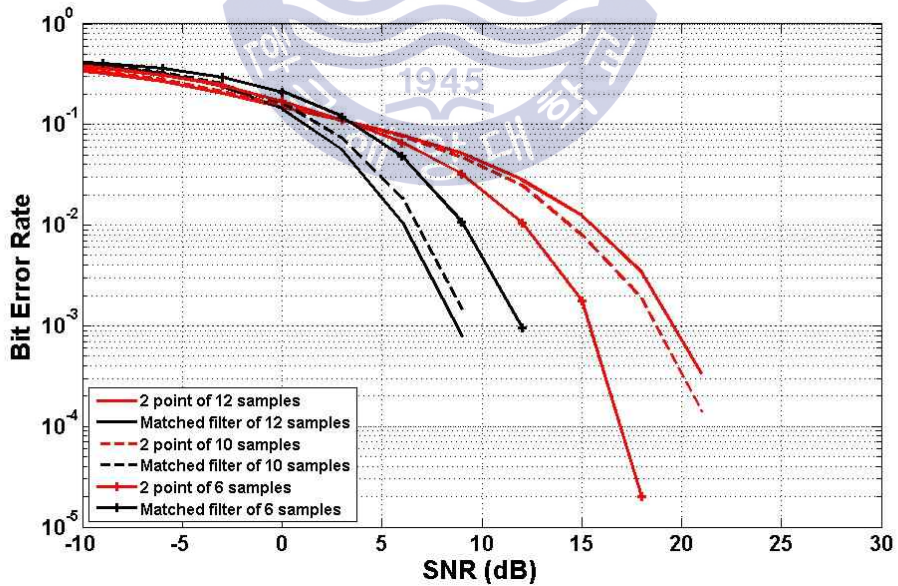


Fig.16 Bit error rate curve of the proposed SL-PPM according to the demodulation

## 4.2 수조실험

### 4.2.1 실험 설계

제안된 방식의 수중 무선 레이저 통신 성능을 확인하기 위해 그림 17과 같이 수조실험을 위한 세트를 구성하였다. 송신부는 신호 전송을 위해 아두이노 R3 호환 보드를 사용하였다. 컴퓨터에서 아두이노 프로그램을 이용하여 신호 데이터를 시리얼 통신으로 레이저 출력을 제어한다. 레이저 구동을 위해 드라이버는 Wavelength 사의 FL591FL 모델을 사용하였고, 레이저는 LS Korea사의 BLSB8510D 모델을 사용하였다. 파장은 녹색 대역인 520 nm이며, 동작 전압은 3 V, 동작 전류는 120 mA, 광 출력은 10 mW 이다. 수신부에서는 포토다이오드를 사용하였는데 Vishay사의 Silicon PN Photodiode 모델을 사용하였으며, 이는 수신 각도 50°, 수신 넓이 7.5 mm<sup>2</sup>인 특성을 갖는다. 포토다이오드로부터 수신된 광 신호는 NI사의 데이터 수집 장치를 사용하여 샘플링하여 컴퓨터로 저장하였다. 신호전송 방식은 기존의 방식인 4PPM과 제안된 SL-PPM 방식으로 하였다. 전송거리는 0.6 m이며, 수조 내 물의 양은 40 L이다. 수조의 재질은 아크릴이며, 수조 벽면에 감쇄를 방지하는 특수 코팅을 하지 않았지만 이로 인한 감쇄는 무시하였다.

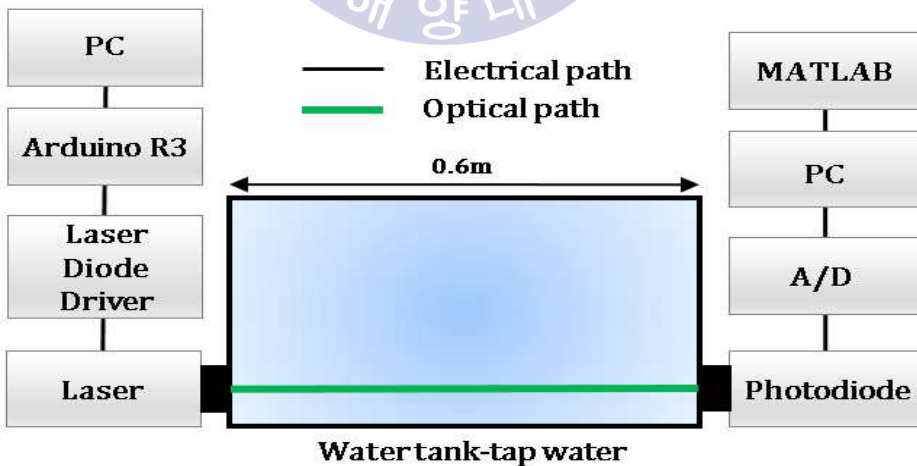
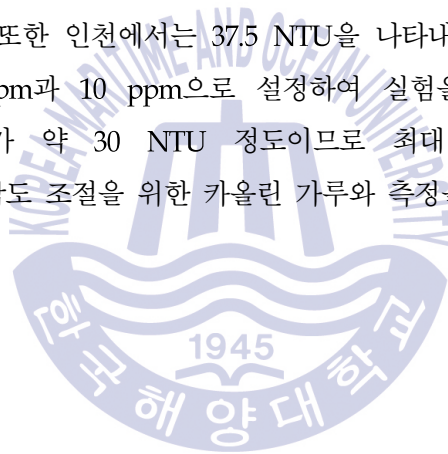


Fig.17 Block diagram for transmitter and receiver

물의 탁도를 나타내는 기준 단위는 JTU(Jackson Turbidity Unit), FTU(Formazin Turbidity Unit), NTU(Nephelometric Turbidity Unit), ppm(Parts Per Million), ABS(Absorbency) 등의 여러 기준이 있다[22]. 보통 해수의 탁도를 나타낼 때 NTU로 표기한다. NTU는 Nephelometer를 사용하여 탁도를 측정하는 단위이다. 산란광을 측정하여 탁도와 관계로 표현된다. 임의로 산란광을 조절하기가 어렵기에 실험에서 탁도를 조절할 때 기준 탁도로 쓰이기 어렵다. NTU와 ppm 사이의 정확한 관계식은 없지만 대략적으로 측정치를 비교하면  $3NTU \approx 1ppm$ 을 나타낸다[23]. 따라서 수조 실험에서는 물의 기준 탁도를 ppm을 사용하였다. 표준 ppm 단위는 KTU(Kaolin Turbidty Unit)라고도 불리며  $1mgSiO_2/L$ 를 표준으로 한다[24]. 정제된  $SiO_2$ (Kaolin)를 사용하여 탁도를 조절하였는데 문헌에 의하면 국내의 대표적인 항구인 부산 신항에서는 평균 6 NTU, 또한 인천에서는 37.5 NTU을 나타내는 것으로 보고되어 있어 이를 참고로 하여 5 ppm과 10 ppm으로 설정하여 실험을 수행하였다[25]. 혼탁한 연안이나 부두의 탁도가 약 30 NTU 정도이므로 최대 10 ppm으로 설정하여 실험하였다. 그림 18은 탁도 조절을 위한 카올린 가루와 측정을 보여준다.





(a)



(b)

Fig.18 (a) Measuring Kaolin powder, (b) Kaolin powder

#### 4.2.2 실험결과

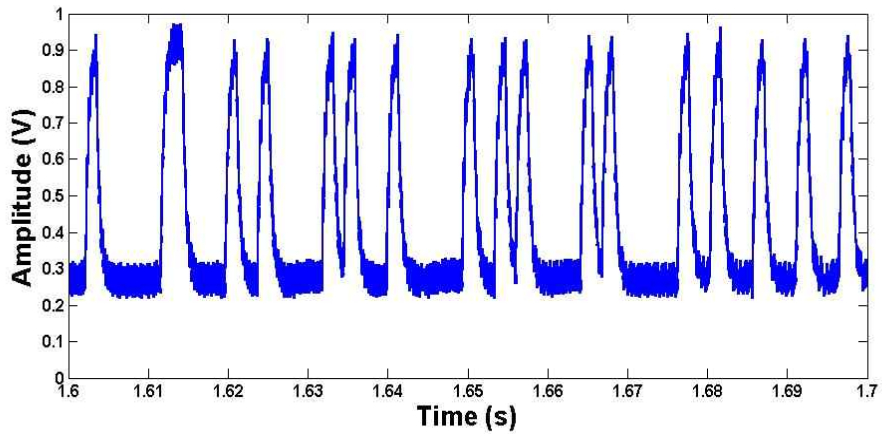
그림 19는 수조 실험을 실행한 사진이다. 제안된 방식과 기존의 방식으로 수조 실험을 진행하였다. 복조 과정에서 기울어진 펄스를 만들 때 생기는 잡음과 시스템 잡음을 제거하기 위해 저역 통과 필터를 사용하였다. 탁도를 조절하면서 각 방식의 성능을 비교하였다. 그림 20은 기존의 방식 4-PPM으로 수신된 신호를 보여주며, 그림 21은 제안된 방식으로 수신된 신호를 보여준다. 기존 4-PPM 방식의 신호 파형은 마치 기울어진 펄스의 파형을 가지고 있는 것처럼 보이는데 그 이유는 레이저를 구동할 때 사용되는 드라이버의 동작 성능 때문이다. 탁도가 증가하면서 수신 신호 전압의 감소를 볼 수 있다. 이는 탁도가 증가하면서 산란 현상이 증가하여 빛 퍼짐 현상이 생겨 수신 측에서 받는 전압이 약해지는 현상이다. 수신신호 전압 강하는 신호 성능 저하를 야기한다. 실제 환경에 적용할 때에는 이 문제를 보완할 수 있는 연구가 필요하다.

레이저는 안구의 안전 문제가 있기 때문에 광 세기의 제한이 있다. 이렇게 제한된 상태에서 다른 방법을 이용하여 예를 들어 렌즈와 같은 집광장치를 이용하여 산란에 의한 레이저의 빛 퍼짐 현상을 줄여주는 방법 등과 같은 연구가 필요하다.

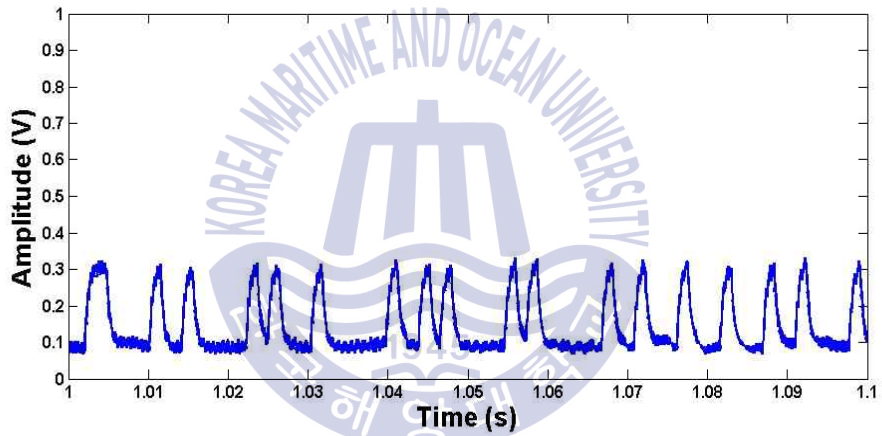


**Fig.19** Experimental setup on water tank

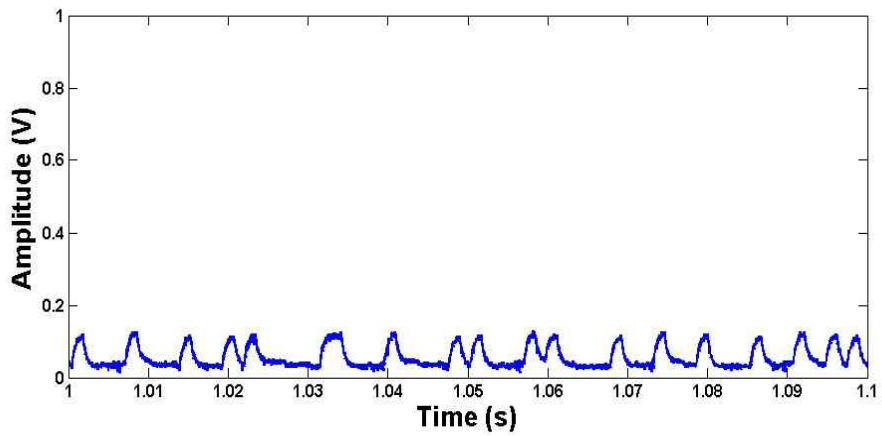




(a)

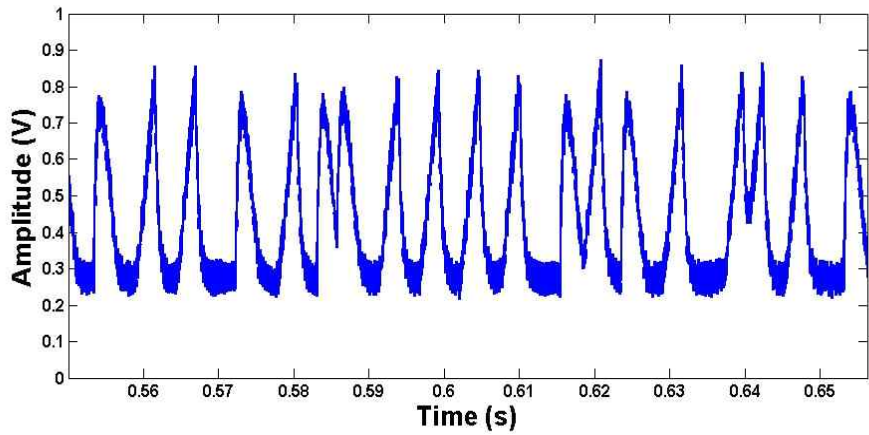


(b)

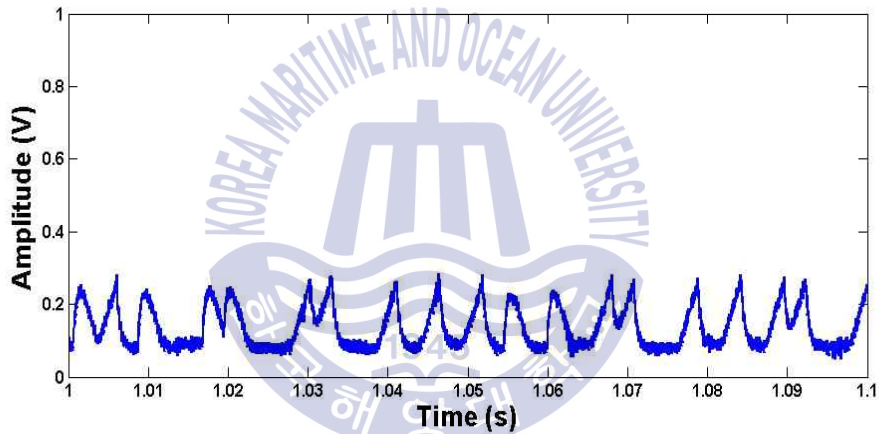


(c)

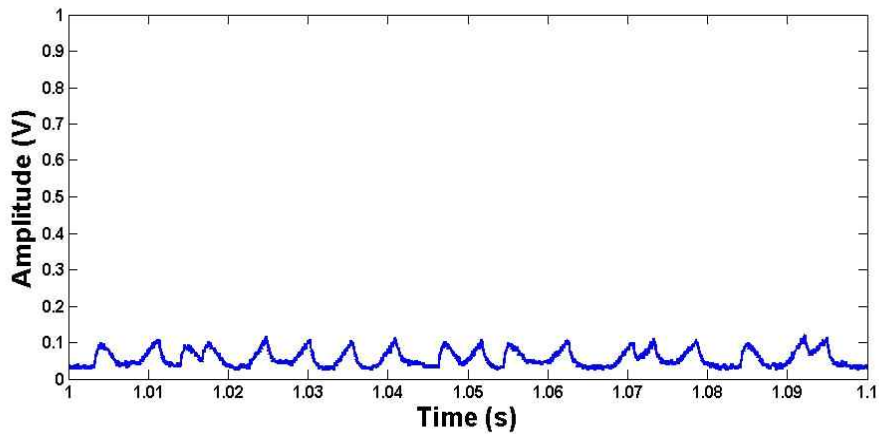
Fig.20 Received 4-PPM signal, (a) 0 ppm, (b) 5 ppm, (c) 10 ppm



(a)



(b)



(c)

Fig.21 Received SL-PPM signal, (a) 0 ppm, (b) 5 ppm, (c) 10 ppm

표 2는 탁도와 변조 방식에 따른 비트 오류율을 나타낸 것이다. 0 ppm에서는 모두 오류가 없는 성능을 보였다. 5 ppm에서는 기존의 방식이 나은 성능을 보였지만 유의미한 정도로 차이가 나지는 않았다. 제안된 방식의 비트 오류율은 채널 부호화 기법을 결합하여 사용한다면 발생하는 오류를 모두 정정할 수 있는 범위 안에 있다. 10 ppm에서는 기존의 방식의 비트 오류율이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 여러 패킷을 복조하였을 때, 비트 오류율이 0이 나오는 패킷도 있었지만, 전압 강하 현상으로 수신 전압이 낮아진 상태에서 전력 소모량이 많으면 성능이 떨어지게 되는데 그 영향으로 잡음으로 인한 펄스 신호가 구별이 안 되는 패킷도 존재하였다. 따라서 전체적인 비트 오류율 관점으로 해석하였을 때 기존의 방식은 상대적으로 높은 오류율이 나오는 것으로 보인다. 하지만 모의실험에서는 기존 방식의 비트오류율 성능이 우수하였는데 이러한 결과는 제한된 장비로 인한 영향을 많이 받아서 생긴 결과로 보여진다. 제안된 방식은 동일하게 전압 강하 현상이 일어났지만, 모든 패킷이 일정한 비트 오류율을 나타내었다. 앞 장의 모의실험 내용에서 볼 수 있듯이 제안된 방식은 기존의 방식에 비해 전력 효율성 관점에서 우수하다. 수조 실험의 결과는 장비의 제한으로 인하여 다음과 같은 비트오류율이 나타났다.

**Table 2** Bit error rate by transmission technique and turbidity

modulation \ ppm	0	5	10
4-PPM	0	0	0.272
SL-PPM	0	0.057	0.071

## 제 5 장 결 론

최근 수중 활동의 증가로 수중 무선 통신 시스템에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 일반적으로 수중에서 적용되었던 수중음향통신의 문제점을 보완해 줄 새로운 수중통신 방법으로 레이저를 이용한 무선 통신이 대두되고 있다. 수중에서 레이저를 이용한 무선 광통신을 할 때 중요한 요소는 수중 광 채널에 의한 흡수와 산란이다. 흡수를 최소화하기 위해 물속에서 흡수가 가장 적은 청색 또는 녹색 대역의 레이저를 사용한다. 산란 현상은 물속에 용해된 물질 등에 따라 영향을 많이 받는데 이는 탁도와 관련이 깊다. 따라서 탁도에 따른 통신 성능 분석에 관한 연구가 필요하다.

광을 이용한 무선 통신을 할 때 주로 사용되는 통신 방식은 IM/DD 계열의 온-오프 키잉과 펄스 위치 변조 방식이다. 펄스 위치 변조 방식은 온-오프 키잉 방식에 비해 잡음 방지 성능이 좋다. 이에 본 논문에서는 펄스 위치 변조 방식을 기반으로 한 새로운 방식으로써 SL-PPM 방식을 제안하였다. 이는 기울어진 펄스를 이용하여 위치 정보뿐 아니라 기울기 정보를 함께 사용하는 방식이다. 제안된 방식은 변조 과정에서 기존의 방식과 심볼 길이 또는 펄스 길이의 동일화를 선택하여 할 수 있는데 심볼 길이 동일화는 기존의 방식에 비해 동일한 전력 효율 범위 안에서 광의 지속시간을 늘려 레이저 동작 속도의 민감도를 낮춘다. 펄스 길이 동일화는 기존의 방식에 비해 대역폭 효율과 전력 효율이 두 배 증가한다.

본 논문에서는 기존의 방식과 제안된 방식으로 모의실험과 수조실험을 수행하였다. 모의실험에서는 기존의 방식과 제안된 방식의 변조 방법과 복조 방법에 따라 비트 오류율 관점에서 비교하였다. 비트 오류율 관점에서는 기존의 방식의 성능이 다소 높게 보였지만, 입력 비트에 따른 대역폭 효율 관점에서는 제안된 방식의 성능이 우수함을 볼 수 있었다. 또한 제안된 방식을 복조하는 방법으로 두 점 또는 다중 점을 사용하는 방법과 정합 필터를 사용하는 방법을 비교하였다. 샘플 수가 많을 경우에는 정합 필터가 성능이 좋지만 샘플 수가 감소함에 따라 그 차이가 점차 줄어드는 것을 알 수 있었다. 또한 계산 시간에서 점을 사용하는 방법이 정합 필터를 사용하는 방식보다 약 20배 정도 빠른 것을 알 수 있었다.

수조 실험에는 520 nm의 레이저와 포토다이오드를 사용하여 시스템을 설계하여 수행하였다. 수조 실험의 기준 탁도 단위는 ppm을 사용하였고, ppm 조절을 위해 정제된 카올린 가루를 사용하였다. 비트 오류율 관점에서 성능을 분석하였을 때, 맑은 물의 경우 모든 방식에서 좋은 성능을 보였으며, 탁도가 증가할수록 전압이 낮아지는 현상도 확인할 수 있었다. 제한된 레이저 장비를 구동할 때는 제한된 환경 안에서 보다 더 효율적으로 통신을 이루는 것이 중요하다. 제안된 방식은 기존의 방식에 비해 전력 효율성이 우수하다. 따라서 수조 실험 시 레이저 장비의 안정성을 높일 수 있었다.

IM/DD 계열의 전송 방식들은 다양한 변형과 응용이 가능하다. 실제 해양 환경에 맞는 새로운 전송 방식을 더 연구해야 할 필요성이 있다. 또한 본 논문에서 제안된 방식으로 향후 국내 연안에서 실제 실험을 수행하고, 탁도가 증가함에 따라 보이는 전압 강하 현상을 보상할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다. 또한 본 논문에서는 매우 짧은 단거리 통신이기에 레이저의 정렬을 수기로 하였지만, 전달 거리가 멀어지는 경우 정확도를 증가시키기 위해 레이저의 빔 초점 정렬에 관한 연구도 진행되어야 한다. 마지막으로 대부분의 광학 장비는 매우 고가이지만 본 논문을 위한 실험에서 사용된 장비의 제한으로 인하여 고속 전송 실험을 수행하지 못하였으므로 이에 대한 연구도 진행되어야 한다.

## 참고문헌

- [1] Hassan Makine Oubei, Changping Li, Ki-Hong Park, Tien Khee Ng, Mohamed-Slim Alouini, and Boon S. Ooi, "2.3 Gbit/s underwater wireless optical communications using directly modulated 520 nm laser diode," *Optics Express*, vol. 23, no. 16, pp. 20743-20748, Aug. 2015.
- [2] Hemani Kaushal, and Georges Kaddoum, "Underwater Optical Wireless Communication", *IEEE Access*, vol.4, pp.1518-1547, Apr. 2016.
- [3] 김영평, 최종운, "청록색 레이저의 수중 통신 응용", 한국통신학회 논문지, 제16권, 12호, pp.1211-1218, 1991.
- [4] Kazuhiko Nakamura, Izumi Mizukoshi, and Masanori Hanawa, "Optical wireless transmission of 405 nm, 1.45Gbit/s optical IM/DD-OFDM signals through a 4.8 m underwater channel," *Optics Express*, vol.23, no.2, Jan. 2015.
- [5] Hassan M. Oubei, Jose R. Duran, Bilal Janjua, Huai-Yung Wang, Cheng-Ting Tsai, Yu-CheihChi, Tien Khee Ng, Hao-Chung Kuo, Jr-Hau He, Mohamed-Slim Alouini, Gong-Ru Lin, and Boon S. Ooi, "4.8 Gbit/s 16-QAM-OFDM transmission based on compact 450-nm laser for underwater wireless optical communication," *Optics Express*, vol. 23, no. 18, Aug. 2015.
- [6] Z. Ghassemlooy, A.R. Hayes N.L. Seed, and E.D. Kaluarachchi, "Digital Pulse Interval Modulation for Optical Wireless Communications," *IEEE Communications Magazine*, vol.36, no.12, Dec. 1998.
- [7] Joshua Baghdady, Keith Miller, Kaitlyn Morgan, Matthew Byrd, Sean Osler, Robert Ragusa, Wenzhe Li, Brandon M. Cochenour, and Eric G. Johnson, "Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing," *Optics Express*, vol. 24, no. 9, pp.9794-9805, Apr. 2016.
- [8] Tsai-Chen Wu, Yu-Chieh Chi, Huai-Yung Wang, Cheng-Ting Tsai, and Gong-Ru Lina, "Blue Laser Diode Enables Underwater Communication at 12.4 Gbps," *Scientific Reports*, vol. 7, pp.40480, Jan. 2017.

- [9] Sui Meihong, Yu Xinsheng, and Zhou Zhangguo, "The Modified PPM Modulation for Underwater Wireless Optical Communication", *Proc. International Conference on Communication Software and Networks*, Macau, China, 27-28 Feb. 2009.
- [10] Shijian Tang, Yuhan Dong, and Xuedan Zhang, "Impulse Response Modeling for Underwater Wireless Optical Communication Links," *IEEE Trans. Communications*, vol. 62, no.1, pp.226-234, Jan. 2014.
- [11] Pearl Antonette Mendez, and Rithu James, "Design of Underwater wireless optical/acoustic link for reduction of back-scattering of transmitted light," *International Journal of Engineering and Science*, vol.4, no.5, pp.61-68, May 2015.
- [12] Simpson, Jim Anto, A 1 Mbps Underwater Communications System using LEDs and Photodiodes with Signal Processing Capability, Master thesis, Raleigh, North Carolina, 2007.
- [13] G. Cossu, R. Corsini, A. M. Khalid, S. Balestrino, A. Coppelli, A. Caiti and E. Ciaramella, "Experimental Demonstration of High Speed Underwater Visible Light Communications," *International Workshop on Optical Wireless Communications*, pp.11-15, Newcastle upon Tyne, UK, Oct. 2013.
- [14] Z. Ghassemlooy, A.R. Hayes, N. L. Seed, and E.D. Kaluarachchi, "Digital Pulse Interval Modulation for Optical Wireless Communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 12, pp.95-99, Dec 1998.
- [15] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S.R Aibhandari, *Optical wireless communication*, CRC Press, Mar. 2017
- [16] Xiaoyan Liu, Suyu Yi, Ran Liu, Lirong Zheng, and Pengfei Tian, "34.5 m Underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser with NRZ-OOK modulation", *Optics Express*, Beijing, China, Nov. 2017.
- [17] Da-shan Shiu, and Joseph M. Kahn, "Differential Pulse-Position Modulation for Power-Efficient Optical Communication", *IEEE Trans. Communications*, vol.47, no.8, Aug. 1999.

- [18] J. Das, "Pulse slope modulation - A new method of modulating video pulses and its possible applications on the line circuits," *Indian J. Physics*, vol. 28, pp.449-462, 1954.
- [19] Minseok Oh, " Pulse Dual Slope Modulation for VLC," *KSII Trans. Internet and Information System* vol.8 no.4 pp.1276-1291 Apr. 2014.
- [20] Thomas Lüftner, "Edge Position Modulation for Wireless Infrared Communications," Der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg zur Erlangung des Grades
- [21] Kwon-Eui Hong, "Packet Error Rate comparison of Different Modulation Formats over Terrestrial Optical Wireless Communication in Turbulent Atmosphere" *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol.39B, no.12, Nov. 2014.
- [22] John Daly, "What is Turbidity?", ISA NorCal , unpublished
- [23] Sean Lancaster, "How to Convert PPM to NTU", Sciencing, March 13, 2018
- [24] Spencer A. Peterson, and Karen K. Randolph, Corvallis Environmental Research Laboratory, Management of bottom sediments containing toxic substances, pp.288-289, 1976.
- [25] 장인성, 원덕희, 백원대, 신창주, 이승현, "국내 주요 항만 인근의 탁도 특성 분석," 한국산학기술학회 논문지, vol.16, no.12, pp.8889 - 8895, Dec. 2015.



## 감사의 글

대학원에서 많은 추억과 경험을 마음 깊이 새기며 2년이라는 시간이 지나갔습니다. 대학원에서 보낸 시간은 사람과 사람사이의 믿음과 신뢰와 배려 속에서 온기와 따뜻함을 느끼며 지식 함양에 정진 할 수 있었습니다. 모두에게 감사드리며 앞으로 시련과 고비가 오더라도 이겨낼 수 있는 힘의 밑거름이 되는 소중한 시간입니다.

먼저 저를 이끌어 주신 김기만 교수님께 감사인사를 드리고 싶습니다. 캄캄한 어둠속에 갇힌 것 같은 시련을 겪을 때, 촛불처럼 저를 믿어주시고 기다려 주셔서 무사히 2년이라는 시간을 보낼 수 있었습니다. 대학원을 떠나 새로운 사회에서 지내면서 힘든 순간이 오더라도 항상 그 때의 믿음과 배려를 잊지 않고 마음 깊이 새기겠습니다. 제 논문을 심사하시며 더 나은 논문으로 거듭나게 도와주신 정지원 교수님, 조형래 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 학부 과정에서 많은 지도를 해주신 김동일 교수님, 강인호 교수님, 운영 교수님, 민경식 교수님께도 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 항상 교수님들의 가르침을 기억하여 성숙한 사회 구성원으로 부끄럽지 않은 제자가 되겠습니다.

대학원 생활을 하며 친 오빠처럼 항상 챙겨주고 편하게 해주신 병철이 오빠, 아직 미숙한 신입생인 저를 따뜻하게 가르쳐 주시던 찬호오빠, 형우오빠, 지홍이오빠, 제 고민을 마치 언니의 고민처럼 들어 주시던 창은이언니, 그리고 큰마음과 사랑으로 저를 보듬어 너무 많은 고마움을 느끼게 해준 은혜언니, 함께 대학원에 진학하여 친구처럼 편하게 대해준 택익이오빠와 현수오빠, 실험실에서 항상 즐겁게 해주던 웅진이오빠, 태웅이오빠, 근혁이, 실험실 막내로 최선을 다하는 주형이, 학부시절부터 나의 반쪽으로 항상 내 옆에서 언제나 내편으로 있어준 유진이, 언제나 생각만으로도 든든한 가영이, 지윤이, 경은이, 코지사람들, 항상 나의 미니미로 언제나 나의 경호원이 되어주는 동생 남원이, 바쁘다고 시간 많이 못 보내도 문제행동 하나 없이 순한 참이에게 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 떠나면 타지에 딸을 보내놓으시고 항상 걱정스러운 마음에 노심 초사하시며, 혹여 부담이 될까 보고 싶은 마음 숨기고 응원과 격려로 따뜻하게 믿어주신 사랑하는 엄마 김미자, 사랑하는 아빠 김정기에게 바칩니다.