

## 해수채널 환경에서 가시광 통신 성능 해석

손경락<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2013년 6월 12일, 원고수정일 : 2013년 7월 12일, 심사완료일 : 2013년 7월 15일)

### Performance analysis of the visible light communication in seawater channel

Kyung-Rak Sohn<sup>†</sup>

**요약:** 무선 가시광 통신 기술은 실내 또는 수중에서 고속 통신 서비스가 가능하여 많은 주목을 받고 있다. 그러나 가시광에 대한 해수채널의 통신 성능은 현재의 가시광 파장영역 광원과 광 검출기 기술의 한계와 수중 통신채널의 변화로 인한 여러 가지 제약사항들 때문에 실용화를 위해서는 극복해야 할 문제점들이 존재한다. 본 논문에서는 직선상의 가시영역에 있는 해수 환경에서 신호 대 잡음비와 비트 오류율을 분석하였다. 데이터 속도, 통신거리, 감쇠계수등과 같은 파라미터들의 영향에 대하여 연구하였으며, OOK와 L-PPM 변조기법을 적용한 시스템의 모델링과 전산모의를 통하여 수중환경 통신에 대한 장점과 제한점등을 기술하였다.

**주제어:** 수중통신, 가시광 통신, 해수 광 채널, 감쇠계수

**Abstract:** The wireless visible light communication technology has received great attention for high-data rate services in the room and underwater. However, performance of a visible light seawater link is limited by multiple constraints from the current light source and detector technology, and underwater channel conditions. In this paper, performance of the line of sight underwater link was analyzed in terms of signal to noise ratio and bit error rate of the detector. Roles of different parameters such as data rate, transmission distance, and attenuation coefficient, are studied. Through the modeling and simulation of the OOK and L-PPM modulation technologies for undersea environment application, the advantages and limitations are described in detail.

**Keywords:** Underwater communication, Visible light communication, Seawater optical channel, Attenuation coefficient

## 1. 서론

수중통신에 관한 최근의 연구동향을 살펴보면 해안 감시시스템, 해양환경연구, 수중자율운동체 등의 다양한 응용을 위한 수중센서네트워크 구축에 상당한 관심과 기초연구가 보고되고 있다[1]. 이러한 시스템들 간의 연동은 궁극적으로 수중의 통신 인프라를 요구하게 된다. 현재 수중 통신을 위한 방법은 음파, 고주파 및 광파로 크게 분류되며 각각의 기술에는 장점과 제한적 요소가 동시에

존재한다. 음파를 이용한 통신기술은 수중에서 신호감쇠가 작고 열적 안정성이 우수하여 가장 다양하게 그리고 광범위하게 사용되고 있으며 특히 심해에서 장거리 통신방식으로 주목받고 있다. 그러나 얕은 바다에서는 온도 변화와 분포에 영향을 받게 되고 수면에서 발생하는 잡음에 민감하며 음파의 반사와 굴절에 의한 다중경로 진행파의 간섭을 고려하여야 한다. 수중에서의 음파속도는 진공에서보다 5배정도 빠르지만 전자파에 비하여 매우

<sup>†</sup> Corresponding Author: Department of Electronics and Communications Engineering, College of Engineering, Korea Maritime University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-Gu, Busan 606-791, Korea, E-mail: krsohn@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4312

느리므로 정보전송용량이 수 kbps 이하로 제한된다. 이를 해결하기 위한 방안으로 훨씬 높은 주파수 대역의 전자파를 고려할 수 있지만 물이라는 매질의 특성상 고주파수에서는 전도성을 보이기 때문에 감쇄가 심하여 통신이 어렵다. 통신이 가능하다고 하더라도 매우 높은 안테나 출력을 요구하게 되고 통신거리는 수 십 m 이하로 제한적이다. 주파수가 낮아지게 되면 안테나의 크기가 문제가 되므로 연구가 미진한 상태이다[2][3].

수중에서 단거리 무선통신을 목표로 한다면 가시광 대역의 빛을 이용하는 방법이 유력한 후보가 될 수 있으며, 심해의 맑은 해수조건이라면 고속 데이터 통신이 가능한 센서네트워크 구축도 가능하다. 광 주파수 영역에서 광 전력은 수중에서 지수 함수적으로 감소하는 경향을 보이며 속도 또한 진공에 비하여 9배 정도 느려지지만 (수중에서 광속은  $2.7 \times 10^7 m/s$  정도이다), 수중음파에 비하여 넓은 대역폭을 제공할 수 있는 THz 영역의 캐리어 주파수를 가지므로 비디오 영상전송 및 실시간 수중시스템 제어가 가능한 이점을 가지고 있다. 본 연구에서는 가시광 영역에서 해수의 흡수계수와 산란계수를 이용하여 수중 가시광 통신에 미치는 영향을 분석하여 전산모의 하였다. 수중의 탁도가 통신거리 및 정보전송요량에 미치는 영향을 공기 중 가시광통신 특징과 비교하여 제시하였으며, 비트오류율 (Bit error rate: BER)을 계산하여 통신 성능을 확인하였다.

## 2. 해수채널 특성

광파를 이용한 통신의 가장 큰 장점 중 하나는 1 Gbps 이상의 데이터 전송률이 가능한 넓은 대역폭을 제공한다는 것이다. 그러나 무선 광통신을 수중에 적용할 경우 광신호가 수중에서 급격히 흡수되는 점과 수중의 부유물과 플랑크톤 등에 의한 산란으로 신호가 감쇠된다는 단점이 있다. 수중 가시광 통신의 가능성과 성능을 평가하기 위한 통신 시스템 및 채널 모델을 Figure 1로 표현하였다. 광원과 수광 소자간의 거리는  $d$ 이며 광원 파장에 대한 해수 손실과 일반적인 채널의 잡음으로 가산적 백색 가우시안 노이즈 (Additive white Gaussian

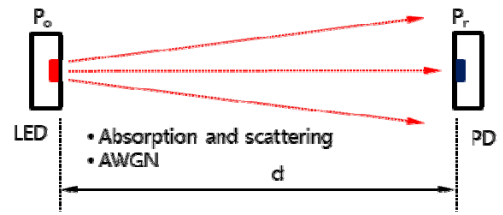


Figure 1: Schematic of the underwater channel model

noise: AWGN)를 고려하였다.

특정 파장에서 방출되는 빛의 세기를  $I(\lambda)$ 라 하고 수중에서 미소거리  $dz$  만큼 진행했을 때 감쇠된 빛 세기를 Beer의 법칙을 이용하여  $dI(\lambda)$ 로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$dI(\lambda) = -c(\lambda)I(\lambda)dz \quad (1)$$

양변을 송수신거리  $d$ 에 대하여 적분하면 목표지점에 도달하는 광세기를 구할 수 있으며 식 (2)로 주어진다.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-c(\lambda)d} \quad (2)$$

여기서  $I(\lambda)$ 는 수신기가 놓인 거리  $d$ 에 도달한 광세기,  $I_0(\lambda)$ 는 송신기 ( $d=0$ )의 초기 광세기이며,  $c(\lambda)$ 는 물의 흡수계수와 산란계수의 합으로 주어지는 감쇠계수이다. 흡수와 산란정도는 빛의 파장과 물의 탁도에 의존하는 파라미터이다. 다양한 수질에 대하여 514 nm의 가시광 파장에서 측정된 흡수와 산란계수는 Table 1과 같다.

Table 1: Absorption and scattering coefficient of various types of water at 514 nm wavelength [1]

Water type	Absorption( $m^{-1}$ )	Scattering( $m^{-1}$ )
Pure seawater	0.0405	0.0025
Clean ocean	0.114	0.037
Coastal ocean	0.179	0.219
Turbid harbor	0.266	1.824

해수의 탁도가 높아 수질이 혼탁할수록 산란에 의한 빛의 감쇠가 크게 일어남을 보여준다.

일반적으로 공기 중 광 무선통신에서 수신광 전력은 거리의 제곱에 반비례하며 수신단의 이득에 비례한다. 이를 수중 광 링크에서 적용한다면 해수의 감쇠계수가 포함된 식 (3)으로 수신 광 전력  $P_r$  을 나타낼 수 있다[3].

$$P_r = P_o \frac{A_r}{4\pi d^2} e^{-d(\lambda)d} \quad (3)$$

여기서  $P_o$ 는 송신단의 출력 광 전력,  $A_r$ 은 광 검출기의 물리적인 광 수신 면적이며  $d$ 는 송수신단간 직선거리이다. 해수의 감쇠계수가 클수록 수신광 전력은 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있다.

Table 2는 해수 채널에 대한 가시광 통신 성능 전산모의를 위하여 본 논문에서 사용한 파라미터 값이다. 송신광원은 514 nm 중심파장을 가지는 LED 이며, 출력 광 전력은 5 W (~37 dBm) 이다. 수광 소자의 파라미터는 OSRAM의 실리콘 기반 PIN 형 광 검출기 (PIN PD)로 모델명은 SFH-213 이다. 에버런치 광 다이오드 (Avalanche photodiode)는 Hamamatsu 사의 S5343의 파라미터를 이용하였다.

Table 2: Numerical calculation parameters

Initial power $P_o$		5W (~37 dBm)
Wavelength, $\lambda$		514 nm
Data rate, $R$		1 Mbps
Modulation scheme		OOK, L-PPM
PIN PD	Quantum efficiency, $\eta$	0.93 Electrons/photon
	Detection area, $A_r$	1 mm <sup>2</sup>
APD	gain, $G$	50
	Quantum efficiency, $\eta$	0.8 Electrons/photon
	Effective active area	$\phi = 1.0$ mm

Figure 2는 Table 1에서 제시한 몇 가지 수질에 대하여 계산한 수신 광 전력의 변화를 보여준다. 수광 소자가 광원으로부터 멀리 떨어질수록 수신 전력은 지수 함수적으로 감소하여 통신가능 거리는 매우 제한적인 영역으로 한정된다. 그러므로

수신 영역을 확장하거나 광 다이오드 이득이 큰 APD를 사용하는 것이 요구된다.

일정한 통신거리에서 해수 감쇠계수에 따라 수 광 전력의 변화를 Figure 3에서 보여준다. 1 m 이하의 근거리에서는 탁도 변화에 대한 수신 전력의 변화가 크지 않지만 그 이상의 통신거리에서는 감쇠계수의 영향을 크게 받게 되므로 해수의 탁도 변화 및 유기물에 의한 빛의 산란계수가 높아짐으로서 통신 성능이 급격히 저하될 수 있다.

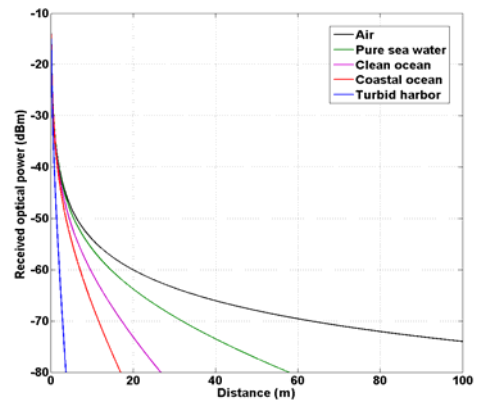


Figure 2: Received optical power vs. distance in terms of water types

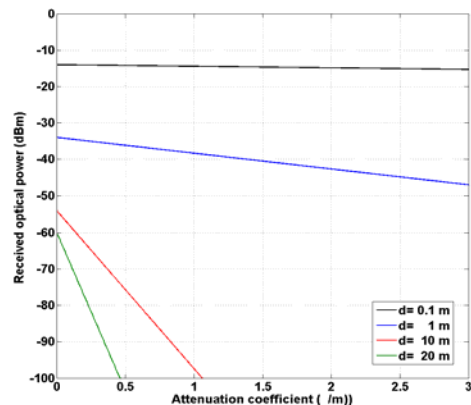


Figure 3: Received optical power vs. attenuation coefficient for different transmission distance

### 3. 수중 가시광통신 성능분석

Shannon-Hartley 정리에 따르면 채널용량 ( $C$ )은 채널모델 및 전송제약조건이 주어진 상태에서 식 (4)으로 표현된다.

$$C = W \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (4)$$

여기서  $W$ 는 시스템 대역폭이다. SNR (Signal-to-noise ratio)은 신호전력 대 잡음전력 비이며 식 (5)로 주어진다. 수신기의 이득과 수신 광 전력에 비례하며 수신 데이터 속도에 반비례하는 함수로 표현된다[4].

$$SNR = \frac{\eta GP_r}{2Rhc/\lambda} \quad (5)$$

$\eta$ 는 양자효율,  $G$ 는 수신기의 이득,  $R$ 은 데이터 속도,  $h$ 는 플랑크 상수 ( $6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$ ),  $c$ 는 광속이다. 식 (3)로부터 계산된 수신 광 전력  $P_r$ 을 식 (5)에 대입하여 정리하면 LED에서 방사된 광 출력을 이용하여 SNR을 구할 수 있는 식 (6)이 된다.

$$SNR = \frac{\eta \lambda GP_0 A_r}{8\pi d^2 Rhc} e^{-c(\lambda)d} \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 다양한 해수에 대해서 계산된 SNR은 Figure 4와 같다. PIN PD와 APD를 수신 광 다이오드로 이용하여 계산한 결과로부터 심해저와 같은 깨끗한 해수에서는 광전변환 이득이 높은 APD가 SNR을 크게 개선시키지만 탁도가 높은 해안지역 및 항구주변은 산란계수의 영향이 크게 작용하여 가시광 통신 구현에 어려움이 있음을 시사한다.

시스템 대역폭이 100 kHz 일 때 수질별 채널용량을 계산한 결과는 Figure 5로 주어진다. 수중에서 비디오 영상 등을 전송하기 위하여 1 Mbps 이상의 전송속도를 요구할 경우 깨끗한 해수로 알려진 심해에서는 APD로 수신단을 구성하면 40 m 정도의 통신거리를 확보할 수 있으며 이때의 요구되는 SNR은 30 dB 이상이다. 한편 PIN PD를 사용하면

통신가능 거리는 20 m 이하로 SNR은 25 dB 부근이다. 수중에서 충분한 통신거리를 확보하는 측면에서는 APD가 유리하지만 100V 이상의 역방향 전압이 요구되므로 가시광 통신 모뎀 인터페이스를 위한 수중 이동체 및 로봇의 전력 공급 여건에 따라 적용여부가 고려되어야 할 부분이다. PIN PD의 경우는 이득이 1이하이지만 가격이 싸고 수 V 정도의 저전압으로도 구동이 가능하므로 모선과 근접하여 통신하는 경우에는 소비전력 측면에서 유리할 수 있다.

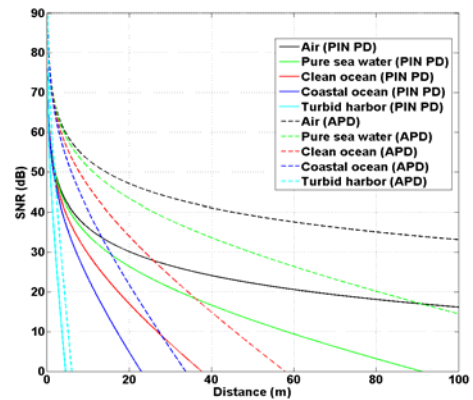


Figure 4: SNR vs. distance for the different types of water

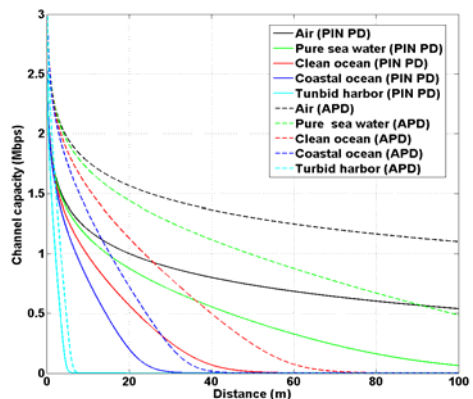
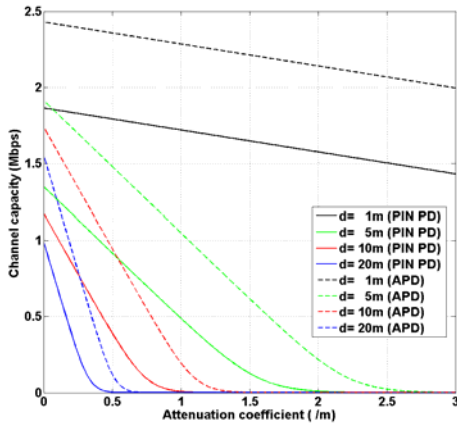


Figure 5: Channel capacity vs. distance for the different types of water



**Figure 6:** Channel capacity vs. attenuation coefficient at the different distances

감쇠계수의 변화에 따른 정보전송용량은 **Figure 6**에 나타내었다. 1 m 내외에서는 해수의 탁도 변화에 대하여 급격한 데이터 전송 속도의 제한은 없으며 1 Mbps 이상을 보장할 수 있다. 그러나 5 m 정도의 송수신단간 거리에도 감쇠계수가 1/m 이상이면 APD를 사용한 경우라도 1Mbps를 보장할 수 없다.

자유공간상에서 사용되어지는 가장 일반적인 광통신 변조기법은 on-off keying (OOK) 이며, 이 방법은 간단한 시스템 구현으로 적용이 가능하여 수중통신에서도 널리 활용될 수 있다. 수중 가시광 통신을 위한 채널환경을 가산적 백색 가우시안 잡음이 있는 AWGN (Additive white Gaussian noise) 채널로 가정할 후 OOK 변조에서 비트오율을 구하면 식 (6)으로 주어진다[5].

$$P_{BER}(OOK) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{SNR}{8}} \right) \quad (6)$$

여기서  $\operatorname{erfc}(x)$ 는 여오차함수 (Complementary error function) 이다.

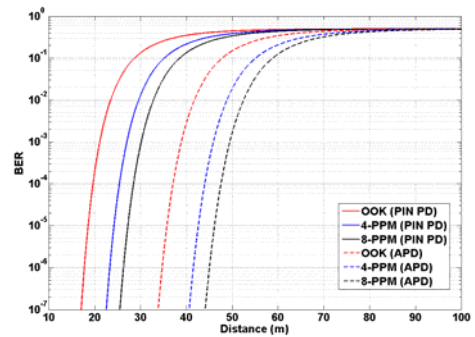
실내 LED 조명통신에서 주로 사용하는 변조 방식은 디밍(dimming) 제어가 가능하면서 깜박임 발생을 최소화 할 수 있는 단일 펄스위치변조 방식 (single-pulse position modulation: L-PPM)이며 직

교 변조 기법으로 잘 알려져 있다[6]. M 개의 메시지 비트를 이용하여  $L (=2^M)$  개의 가능한 시간 천이 중 하나에 단일 펄스를 보내는 방식으로 부호화한다. 본 연구에서는 수중통신 환경에서 OOK 와 L-PPM의 통신성능을 평가하였다. L-PPM의 비트오류 확률은 식 (7)으로 주어진다[7].

$$P_{BER}(L-PPM) = \frac{1}{2^M} \left( \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1-k}{\sqrt{2}} \sqrt{2^M SNR} \right) + \frac{2^M - 1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{k}{\sqrt{2}} \sqrt{2^M SNR} \right) \right) \quad (6)$$

여기서  $k$ 는 수신된 신호의 문턱전압을 결정하는 인자로서 통상 0.45~0.65의 값을 가질 때 최소 에러율을 보이므로 본 연구에서는 0.5로 설정하였다.

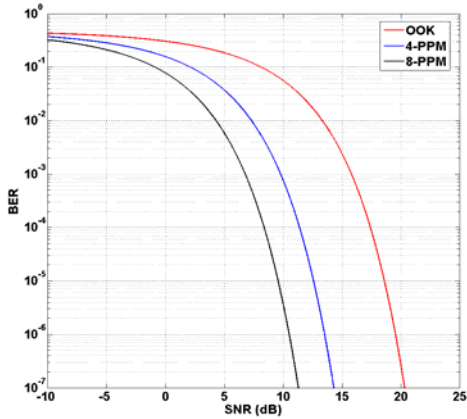
**Figure 7**은 통신거리에 대한 OOK와 L-PPM의 BER 성능을 비교한 것이다. 통신가능 범위 내에서  $10^{-6}$  이하의 BER을 보장하는 조건이라면 APD를 사용한 8-PPM의 경우 40 m 이상의 통신거리를 보장하여 가장 성능이 우수함을 알 수 있다. 그러나 PIN PD 로 구성된 수신기에서 OOK 변조는 10 여 m 정도의 통신거리에서 품질을 보장할 수 있는 수준이다.



**Figure 7:** BER performance against distance according to the modulation techniques

**Figure 8**은 신호 대 잡음비에 대한 BER을 비교한 결과이다. OOK의 경우  $10^{-6}$  이상의 BER을 위해서는 20 dB 정도의 SNR이 요구되지만, 8-PPM의

경우는 10 dB의 SNR로도 동일 조건을 만족시킨다. 즉 수중통신에서도 OOK 변조방식보다 L-PPM의 변조방법이 더 나은 SNR을 보여줌을 알 수 있다.



**Figure 8:** BER performance of different modulations at the different SNR conditions

#### 4. 결론

본 연구에서는 해저에서 근거리 고속 통신으로 주목받고 있는 가시광 통신의 성능을 수신 광 전력, 통신거리, 신호 대 잡음비, 비트 오류 등을 이용하여 전산 모의하였다. 통신 성능에 가장 영향을 미치는 요인은 해수의 탁도에 의해 결정되는 산란 계수이다. 심해의 경우 상대적으로 맑은 해수 환경이므로 1 Mbps 급 데이터 속도로 수십 m 정도의 가시광 무선통신이 가능함을 전산모의 결과로부터 제시하였다. 심해 자원 개발 및 환경 모니터링을 위한 자율 주행 이동체 및 로봇들이 저 전력으로 임무를 수행하면서 무선통신을 하기 위해서는 소형화가 가능하고 전력소비가 낮은 수중통신 모델 기술을 적용하는 것이 유리하다. 이러한 관점에서 LED 기반 가시광 통신은 기존의 음향과 수중통신과 상호보완적인 기술로서 응용될 수 있기를 바란다.

#### 참고문헌

[1] D. Anguita, D. Brizzolaro, G. Parodi, and Q.

Hu, "Optical wireless underwater communication for AUV: preliminary simulation and experimental results," *Proceedings on IEEE Oceans*, pp. 1-5, 2011.

- [2] K-R. Sohn, "A study on the short-range underwater communication using visible LEDs," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 425-430, 2013 (in Korean). [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2013.37.4.425>
- [3] M .Sui, X. Yu, and F. Zhang, "The evaluation of modulation techniques for underwater wireless optical communications," *IEEE International Conference on Communication Software and Networks*, pp. 138-142, 2009.
- [4] Z. Xu, "Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links," *Proceeding of IEEE Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp. 577-580, 2007.
- [5] D-K. Park, "Study on short-range non-line-of-sight ultraviolet communication," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 179-184, 2012 (in Korean).
- [6] X. Fu, G. Chen, T. Tang, Y. Zhao, P. Wang, and Y. Zhang, "Research and simulation of PPM modulation and demodulation system on spatial wireless optical communication," *Symposium on Photonics and Optoelectronic*, pp. 1-5, 2010.
- [7] M .Sui, X. Yu, and Z. Zhou, "The modified PPM modulation for underwater wireless optical communication," *IEEE International Conference on Communication Software and Networks*, pp. 173-177, 2009.