

## LDPC 부호화 기술을 이용한 수중 레이저 통신

이아현\*, 백창욱\*, 이동훈\*\*, 정지원\*\*\*

### Underwater Laser Communication Using LDPC Coded Method

A-Hyun Lee\*, Chang-Uk Baek\*, Dong-Hun Lee\*\*, Ji-Won Jung\*\*\*

**요약** 최근에는 대용량의 데이터를 전송할 수 있는 수중 레이저 통신에 관한 연구가 활발하다. 그러나 수중 레이저 통신은 수중에서 신호의 흡수, 산란 등으로 인한 왜곡에 의해 성능이 감소하며, 이를 보완하기 위하여 채널 부호화 방식을 적용한다. 초기에는 구현이 간단한 RS 부호 및 BCH 부호를 적용하였으나, 거리의 확장, 성능 향상, 해양 채널 환경의 열악성 때문에 강력한 채널 부호화 기술이 요구되었으며, 적용 가능한 부호화 기법들 중 LDPC 부호 방식의 연구가 주목받고 있다. 본 논문에서는 LDPC 부호화 방식과 M-ary PPM 변조 방식을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. LDPC는 부호어의 크기  $N$ 과 M-ary PPM 변조 방식에서  $M$ 의 크기, 송수신간의 거리 등에 따라 성능 분석하였으며, 시뮬레이션 결과 M-ary PPM에서  $M$ 의 값이 성능을 좌우하는 요소임을 확인하였다.

**Abstract** Recent studies have been received much attention on underwater laser communication, which is capable of high data rate. However, in underwater laser communication, distortions caused by absorption and scattering induced performance degradation. A typical way to improve performance is to apply channel coding technique. In the beginning of studies, simple methods such as RS and BCH coding techniques were applied. However, due to distance expansion and performance improvement, channel coding methods with low error probability such as LDPC coded method were applied. In this paper, we analyzed the performance according to the size of the code word  $N$ , the distance between the transceivers and the size of the  $M$  of the M-ary PPM modulation scheme. Simulation results show that parameter  $M$  of M-ary PPM is most effect on performance.

**Key Words** : blue-green laser, channel coding, LDPC, M-ary PPM, underwater laser communication

### 1. 서론

수중에서 신호를 전송하는 방식에는 대표적으로 음파를 이용하는 수중 음향 통신이 있다. 그러나 음파를 이용하는 경우 전송하고자 하는 신호의 대역폭이 좁아 수 십 kHz급의 낮은 데이터 전송률을 가진다. 따라서 최근에는 비록 송수신 거리는 짧더라도 수 백 Mbps급의 데이터 전송을 위한 수중 레이저 통신에 관한 연구가 활발하다[1]. 수중 레이저 통신에서는 레이저의 흡수, 산란 등으로 인한 왜곡이

성능 열화의 주요 원인으로 파악되고 있다[1,2]. 이러한 성능 열화를 보상하기 위한 여러 기법 중 대표적인 기법이 채널 부호화 방식이다. 최근 낮은 신호 대 잡음 비에서 오류 없이 높은 데이터 속도와 원거리 통신을 요구하므로 채널 부호화의 적용이 점점 대두되고 있다. 하지만 흡수 및 산란 등으로 인해 전송 거리에 따른 손실이 매우 크므로 음파에 비해 전송 거리가 제한적이며, 전송률은 송수신 거리와 해수의 탁도 등에 의해 결정되는 신호 대 잡음 비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)에 의하여 제한된다. 수중 레이저

This work was supported by Agency for Defense Development under the contract UD170020DD.

\*Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University

\*\*Agency for Defense Development

\*\*\*Corresponding Author : Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University (jwung@kmou.ac.kr)

Received April 20, 2018

Revised May 04, 2018

Accepted June 09, 2018

통신 채널 환경에서 적용가능한 부호화 방식 중 성능 및 속도 관점에서 비교하였을 때 수중 레이저 통신 환경에서는 LDPC(Low Density Parity Check) 부호의 적용이 적합하며, LDPC 부호 방식과 변조 방식으로는 M-ary PPM(Pulse Position Modulation)을 적용하여 LDPC 부호어의 크기,  $M$  사이즈 및 청록 레이저 채널 환경에서의 거리에 따른 성능을 분석하였다.

## 2. 수중 레이저 통신에 고려되는 전송 기법

청록 레이저를 이용한 수중통신에서 적용이 가능한 부호화 방식으로는 RS 부호, convolutional 부호, 연결 부호, 반복 부호 방식 등이 있으며, 구현의 복잡도가 낮기 때문에 RS 부호가 2008년에 처음으로 적용되어 구현되었으며, 405nm 레이저 다이오드를 이용하여, 3.6m의 수조에서 500kbps 데이터 속도를 가지는 OOK(On-Off Keying) 변조 방식을 이용하여 전송에 성공하였고, 비부호화된 OOK 변조 방식의 성능 보다 BER이  $10^{-4}$ 에서 8dB의 전력을 향상시켰다. 하지만, RS 부호와 BCH 부호는 복호기의 입력 비트가 정판정 되어 복호기로 입력되는데 이는 성능 저하를 초래한다. 따라서 복호 과정에서 반복 기술을 통하여 성능의 향상을 가져오는 반복부호화 기술의 대표적인 turbo부호와 LDPC 부호는 현재 Shannon's limit에 가장 근접한 부호화 기술로써 연구되고 있다.

변조 방식 측면에서 볼 때, 청록 레이저를 이용한 수중 통신에서 채널 부호화 알고리즘의 적용은 변조 방식에 따라 적용이 다르다. W.C. Cox 등은 2008년에 IEEE OCEANS에 OOK 변조 기법과 RS 부호를 적용하여 수중 레이저 송수신 장치를 구현하였으며[3], 2014년에 P. Swathi 등은 수중 레이저 환경에서 PPM 변조 방식과 OOK 변조 방식에서 turbo 부호와 LDPC 부호의 적용함에 있어서 설계 요구 조건을 분석하였다[4]. LDPC 부호의 적용은 2009년도부터 연구되어져 왔는데 주로 PPM 변조 방식과 결합되어왔다. 따라서 본 논문에서는 수중 레이저 채널 모델을 기반으로 LDPC 부호어의 크기, 수중 채널 감쇠 계수, M-ary PPM 변조 방식에서의  $M$ 값에 따라 성능 분석 하며 성능에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터를 제시한다.

### 2.1 채널 부호화 기법

1993년 Berrou 등에 의해 제안된 turbo 부호는 연판정 입/출력이 가능하고, 정보신호에 대해서 서로 다른 인터리버에 의해 분리된 2개 이상의 구성 코드들이 병렬 연결된 구성을 하고 있다. turbo부호의 기본 개념은 선행하는 구성코드의 복호기 연판정 출력 값을 다시 나머지 복호기에 입력하고 이러한 과정을 반복함으로써 향상된 성능을 가능하게 하는 것이다[5].

또한, LDPC 부호는 turbo 부호에 비해 정정되지 않는 오류들을 대부분 검출할 수 있고, 복호화의 복잡도가 낮은 뿐 아니라 좋은 거리 특성으로 오류마루 현상이 나타나지 않고, 완전 병렬 처리로 고속 처리가 가능한 장점이 있다 [6-9].

SOVA(Soft Output Viterbi Algorithm) 부호는 Viterbi 알고리즘을 반복 복호에 적합하도록 변형시킨 알고리즘이다. 이는 내부 부호와 외부 부호를 연쇄시켜서 사용하는 시스템의 성능을 향상시키고자, 내부 복호기의 출력을 연판정 값으로 만드는 방식이다. 이러한 연판정 부호화 기법의 대표적인 3가지 주요 기술의 특징은 다음의 표 1과 같다.

표 1. 연판정 부호화 기술의 특징  
Table 1. Characteristics of the soft decision coding technique

Coding technique	Performance	Decoding speed	Encoding bit	Complexity
Turbo	good	~20Mbps	~3000bits	decoder
LDPC	good	~1Gbps	~64800bits	encoder
SOVA	good	~100Mbps	unlimited	decoder

표 1의 특징을 바탕으로 적용 가능성을 살펴보면, 수중 레이저 통신은 다양한 수중 환경에서 성능 감쇠를 야기시킬 수 있는 환경을 극복하기 위한 성능 향상적인 측면, 레이저 통신의 고속적인 측면에서의 복호 속도 및 전력 효율성 측면에서 본 논문에서는 수중 레이저 통신에 적합한 LDPC 부호를 기반으로 성능을 분석하였다.

### 2.2 변조 방식

수중에서 청록 레이저를 이용한 무선 전송은 주로 광의

유무나 위치를 구분하여 정보를 전송하는 방식이 적용되는데 대표적인 방식으로 OOK와 PPM이 있다. OOK 방식은 펄스의 주기 동안 신호가 1일 때는 광을 전송하며, 0일 때는 전송하지 않는 방식이다. OOK 방식은 한 주기 동안 광을 전송해야 하므로 전력 소모량이 많으며, 많은 데이터를 전송하지 못하는 단점이 있다. 반면, 펄스의 위치를 이용하여 다중 정보를 전송하는 PPM 방식은 시간 도약의 개념을 적용하였다[10]. PPM 방식은 기존의 2진 PPM에서 M진 PPM(M-ary PPM)으로 개념을 확장함으로써 더 많은 정보를 전송할 수 있다. 그림 1은  $M=2,4$  인 M-ary PPM을 나타낸다. OOK와 동일한 펄스의 폭에 대한 샘플 수를  $N_s$ 라 하였을 때,  $M=2$ 인 경우에는 펄스의 위치가 1일 때는 앞, 0일 때는 뒤에 위치시켜 전송한다.  $M=4$ 일 때도 마찬가지로 위치에 따라 정보 비트가 "00", "01", "10", "11"로 구분되어 전송된다.  $M$ 이 증가할수록 레이저 통신의 전력 효율은 상승하나 정보를 나타내는 펄스 폭  $W$ 는 아래 식 (1)과 같이 좁아져 성능은 감소한다.

$$W = \frac{N_s}{M} \quad (1)$$

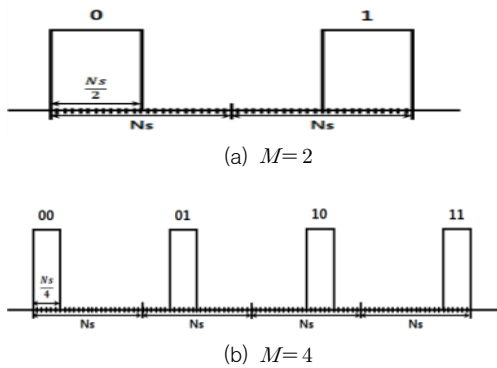


그림 1. M-ary PPM 변조 형태 ( $M=2,4$ )  
Fig. 1. M-ary PPM modulation ( $M=2,4$ )

### 2.3 청록 레이저 수중 통신의 송수신 모델

본 논문에서는 그림 2와 같은 수중레이저 송수신 모델로 성능을 평가하였다.

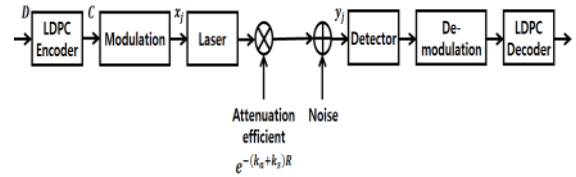


그림 2. 수중 레이저 통신에서 채널 부호화 기술 블록도 (LDPC)  
Fig. 2. Channel coding technique block diagram in the underwater laser communication(LDPC)

그림 2에서 입력 신호의 비트열  $D$ 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \{d_0, d_1, \dots, d_{K-1}\} \quad (2)$$

전송하고자 하는 원 신호 비트열은  $K$ 의 크기를 가지고,  $N$ 은 부호화 된 비트의 길이를 나타낸다. LDPC 채널 부호화기 ( $N, K$ )에서 부호화 된 비트열  $C$ 는 식 (3)과 같다.

$$C = \{c_0, c_1, \dots, c_{N-1}\} \quad (3)$$

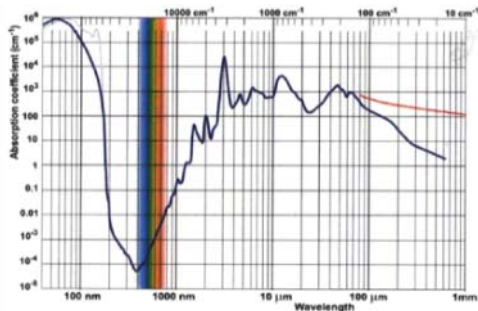
$C$ 비트열의  $N$ 개의 부호어는 M-ary PPM 변조 방식을 적용하며, 변조된 데이터 신호는 수신부로 전송되는데, 수중 레이저 통신에서 수신된 신호  $y_j$ 는 다음 식 (4)와 같다.

$$y_j = x_j e^{-(k_a + k_s)R} + n_j \quad (4)$$

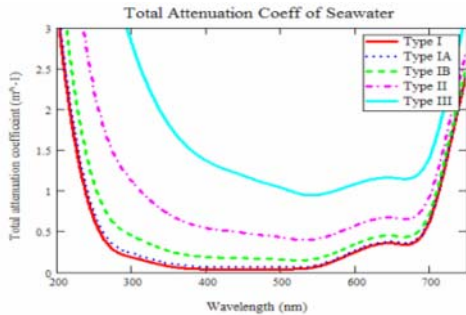
여기서  $x_j$ 는 부호화된 비트를 M-ary PPM 변조한 신호를 나타내며,  $R$ 은 송수신 거리,  $k_a$ 는 흡수 계수,  $k_s$ 는 산란 계수,  $n_j$ 는 잡음을 나타낸다.

레이저는 대역폭이 넓어 고속, 대용량 데이터 전송이 가능하며, 전송 거리에 따른 손실이 매우 크다. 참고문헌 [11]에서는 파장에 따른 흡수 계수 및 파장과 해수의 종류에 따른 감쇠 계수를 분석하였다. 이를 그림 3에 나타내었다. 그림 3 (b)의 Type1은 Open Pacific을 의미하고, Type1A는 Eastern Mediterranean, Type1B는 Western Mediterranean, Type2은 Coastal Water(Azores), Type3은 Coastal Water(North Sea)를 나타낸다. 그림 3. (a)에서 흡수율은 파장 450nm~550nm 대역에서 상대

적으로 낮고, 그림 3 (b)에서 감쇠율 또한 450nm~550nm 대역에서 낮음을 알 수 있다. 따라서 흡수와 감쇠율이 상대적으로 적은 파장 450nm~550nm 대역의 청록 레이저를 사용하며, 감쇠 계수는 0.02로 적용한다. 이 때 전송률은 송수신 거리와 해수의 탁도 등에 의해 결정되는 신호 대 잡음 비에 의하여 제한된다[11].



(a)



(b)

그림 3. (a) 파장에 따른 흡수 계수, (b) 파장과 해수의 종류에 따른 감쇠 계수

Fig. 3. (a) Absorption coefficient according to wavelengths, (b) attenuation coefficient according to wavelengths and seawater

해수에서 일어나는 모든 산란의 절반정도는 입사각의 근처에서 일어난다. 산란 계수는 전방산란에 의해 대부분 결정되는데 청색광은 후방산란에 의해 크게 작용한다. 따라서 청록레이저는 수중 레이저 통신에 적합하다.

### 3. 시뮬레이션 결과

2장의 내용을 기반으로 본 논문에서는 아래 표 2와 같은 파라미터를 이용하여 시뮬레이션을 통한 성능 분석을 하였다. M-ary PPM의 M의 크기, LDPC 부호어의 크기

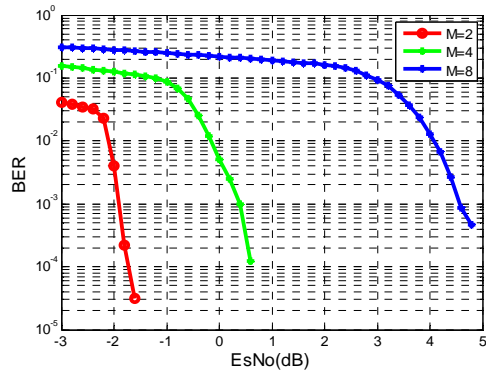
N과 송수신기 거리 R을 변화시키며 성능을 비교 분석하였다.

표 2. 시뮬레이션 파라미터

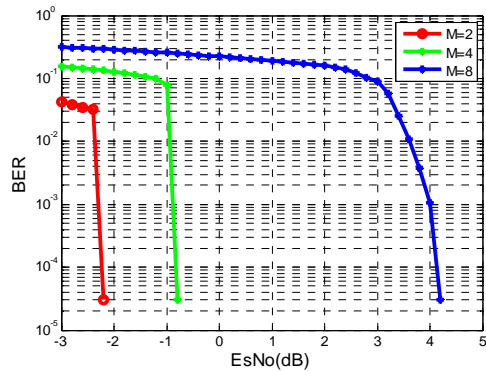
Table 2. Simulation parameter

Channel coding	LDPC .Coding rate : 1/2 .N= 1944, 64800
Modulation	M-ary PPM .M= 2, 4, 8
Channel	.k = 0.02 (k = k <sub>a</sub> + k <sub>s</sub> ) .R = 5m, 10m, 15m
Total data	10 <sup>5</sup>

아래의 그림 4는 LDPC 부호어의 크기 N에 따라 M을 변화시키며 성능을 분석한 그래프이다. 그림 4. (a), (b)에서 알 수 있듯이 N이 64800일 때, N이 1944에 비해 M에 따라 약 1 ~ 2dB 성능 향상이 있음을 알 수 있다.



(a) N = 1944



(b) N = 64800

그림 4. LDPC 부호화 길이 N에 따른 M-ary PPM 성능 분석  
Fig. 4. The performance M-ary PPM according to encoding length N

그림 5는 거리  $R$ 에 따른 LDPC의 성능을 분석한 그래프이다. 부호어의 크기  $N=1944$ 로 고정시키고,  $M=2,4,8$ 를 적용하였다. 그림 5에서 알 수 있듯이  $R$ 이 증가할수록 성능은 감소하며, 역시 동일한 거리에서 M-ary PPM에서 성능이  $M$ 의 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

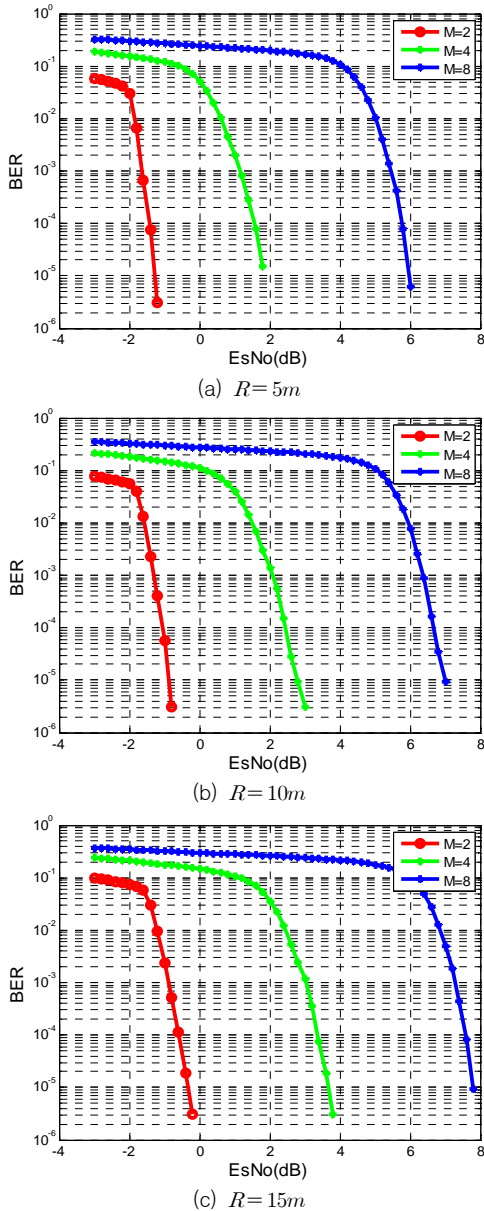


그림 5. 거리  $R$ 에 따른 M-ary PPM 성능 분석 ( $N=1944$ )  
 Fig. 5. The performance M-ary PPM according to encoding distance  $R$  ( $N=1944$ )

따라서 흡수 계수  $k_a$ 와 산란 계수  $k_s$ 의 합, 감쇠 계수  $k$ 를 0.02로 고정시키고 오류율  $10^{-3}$ 에서 요구되는 신호 전력 대 잡음 비율 즉,  $E_s/N_0$ 에 따라 각 파라메타인 거리  $R$ , 부호어의 크기  $N$ , 변조차수  $M$ 에 대한 성능 곡선을 그림 6에 나타내었다. 본 논문에서 고려한 거리, 부호어의 크기, 변조차수 중 성능에 많은 영향을 미치는 파라메타를 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6에서 blue line은 변조 차수  $M=4$ 와 거리  $R=10m$ 로 고정하고 부호어의 크기  $N$ 에 따른 성능을 나타내었다. red line은 부호어의 크기  $N=1944$ ,  $R=10m$ 로 고정하고 변조차수  $M$ 에 따른 성능을 나타내었다. green line은 변조차수  $M=4$ 와  $N=1944$ 로 고정시키고, 거리  $R$ 에 따른 성능을 나타내었다. 성능 분석 결과 거리  $R$ , 부호어의 크기  $N$ 의 변화에 대한 성능 변화는 완만하나, 변조차수  $M$ 에 따라서는 성능이 급격하게 변화됨을 확인하였다. 따라서 수중 레이저 통신에서의 성능 변화는 변조차수  $M$ 이 많은 영향을 끼침을 확인하였다.

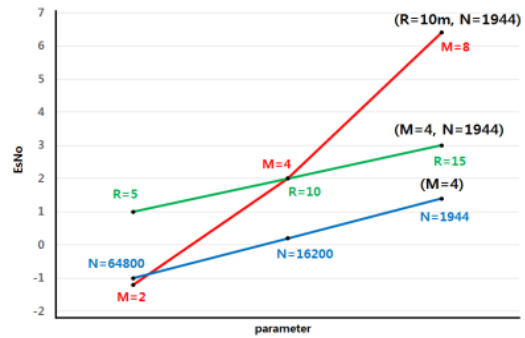


그림 6.  $10^{-3}$ 에서 요구되는  $E_s/N_0$ 에 따른 파라메타의 성능  
 Fig. 6. The performance of parameters according to  $E_s/N_0$  required in  $10^{-3}$

#### 4. 결론

수중 음향 통신은 다중 경로로 인한 심볼 간 간섭으로 인하여 성능이 열화 되는 점에 비해 수중 레이저 통신에서는 수중에서의 레이저 흡수, 산란 등으로 인한 왜곡이 성능 열화의 주요 원인으로 파악되고 있다. 본 논문에서는 청록 레이저를 이용한 수중통신에 적용 가능한 채널 부호화 기술 및 전송 방식에 대하여 분석하였으며, 복호 속도 및 성

능 측면에서 적합한 LDPC 부호를 적용하였다. 변조 방식으로는 고속 전송이 가능한 M-ary PPM 변조 방식을 적용하였다. 채널 환경의 감쇠 계수  $k$ 는 청록 레이저로 가정하여 0.02로 고정하였으며, 부호어의 크기  $N$ , M-ary PPM에서의  $M$ , 송수신 거리  $R$ 에 따른 성능을 분석하였다. 시뮬레이션을 통해  $N$ 이 클수록,  $R$ ,  $M$ 이 작을수록 성능이 향상됨을 확인하였으며, 성능은 부호어의 크기  $N$ 보다는 M-ary PPM의  $M$ 에 대한 영향을 많이 받음을 확인하였고, 동일한  $M$ 에 대해 송수신 거리가 짧을 때는 영향을 덜 받으나 거리가 길수록 영향을 많이 받음을 알 수 있었다. 결과적으로 청록 레이저 수중 통신에서 부호어의 크기  $N$ 은 성능 보다는 청록 레이저의 전력 소모량 측면에서 고려되어야 하며, 거리 및 고속 데이터 전송에 관여되는 변조 방식의 선택이 무엇보다도 중요함을 확인하였다.

## REFERENCES

- [1] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Underwater Optical Wireless Communication", IEEE Access, vol. 4, pp. 1518-1547, April, 2016.
- [2] D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, "The state of art in underwater acoustic telemetry", IEEE J. Oceanic Eng., vol. 25, no. 1, pp. 4-27, Jan, 2000.
- [3] W. C. Cox, J. A. Simpson, C. P. Domizioli, J. F. Muth and B. L. Hughes, "An underwater optical communication system implementing Reed-Solomon channel coding", Proc. IEEE/MTS OCEANS, pp. 1-6, Sept, 2008.
- [4] P. Swathi and S. Prince, "Designing issues in design of underwater wireless optical communication system", Proc. IEEE CISS, pp. 1440-1445, Mar, 2014.
- [5] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding : Turbo-Codes", in Proc. ICC9, May, 1993.
- [6] Z. Cai, J. Hao, P. H. Tan, S. Sum and P. S. Chin "Efficient encoding of IEEE 802.11n LDPC codes", IEEE Electron. Lett., vol. 42, no. 25, pp. 1471-1472, Dec, 2006.
- [7] T. Richardson and R. Urbanke, "Efficient encoding of low-density parity check codes", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 47, no. 2, pp. 638-656, Feb, 2001.
- [8] R. G. Gallager, "Low-density parity-check codes", IRE trans. inform. theory, vol. 8, no. 1, pp. 21-28, Jan, 1962.

- [9] D. J. C. Mackay and R. M. Neal, "Near Shannon limit performance of low-density parity-check codes", Electron. Lett., vol.32, no.18, pp.1645-1646, Aug, 1996.
- [10] S. L. Che, P. Li and X. M. Wang, "Encoding and Decoding Scheme of LDPC Codes Based on Pulse Position Modulation", Electronics & Information Technology, vol. 30, no. 11, pp. 2630-2633, Nov, 2008.
- [11] N. G. Jerlov, "Optical Oceanography", American Elsevier Pub. Co. Inc., 1968.

## 저자약력

### 이 아 현(A-Hyun Lee)

[학생회원]



- 2018년 2월 : 한국해양대학교 전과공학과 (공학사)
- 2018년 2월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전과공학과 석사과정

<관심분야> 위성통신, 이동통신, 변·복조 기술, 채널코딩 등

### 백 창 욱(Chang-Uk Baek)

[정회원]



- 2012년 2월 : 한국해양대학교 전과공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : (주)KTE 기술연구소 연구원
- 2016년 2월 : 한국해양대학교 전과공학과 (공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전과공학과 박사과정

<관심분야> 위성통신, 수중통신, 변·복조 기술, 채널코딩 등

### 이 동 훈(Dong-Hun Lee)

[정회원]



- 1994년 2월 : 경북대학교 전자전기공학과 (공학사)
- 1996년 2월 : 경북대학교 전자전기공학과 (공학석사)
- 1996년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원

<관심분야> 통신 신호처리, 멀티미디어 시스템, 소나시스템

정 지원(Ji-Won Jung)

[정회원]



- 1989년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1991년 2월 ~ 1992년 2월 : LG 정보통신연구소 연구원
- 1995년 9월 ~ 1996년 8월 : 한국통신 위성통신연구실 선임연구원
- 1997년 3월 ~1998년 12월 : 한국전자통신연구원 초빙연구원
- 1996년 9월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전파공학과 정교수
- 2001년 8월 ~ 2002년 8월 : 캐나다 NSERC Fellowship (Communication Research Center 근무)

<관심분야> 위성통신, 수중통신, 변·복조 기술, 채널 코딩, FPGA 기술 등