

# 다이버시티 기법을 이용한 서해에서의 음선 모델기반 수중음향통신 시스템

## Underwater acoustic communication system using diversity based on ray modeled underwater acoustic channel in Yellow Sea

강지웅, 김현수, 안종민, 정재학<sup>†</sup>

(Jiwoong Kang, Hyeonsu Kim, Jongmin Ahn, and Jaehak Chung<sup>†</sup>)

인하대학교 전자공학과

(Received November 10, 2015; accepted December 21, 2015)

**초 록:** 본 논문은 서해의 수중음향 통신 네트워크의 물리계층에 적합한 수중음향통신 시스템을 제안한다. 서해정점의 해양관측정보와 Bellhop 음선 추적프로그램을 이용하여 서해정점의 수중 채널 모델을 구하고 이 수중 채널 모델을 이용하여 통신 변수들을 산출하고 다이버시티 기법이 응용된 CDMA(Code Division Multiple Access)와 SC-FDM(Single Carrier-Frequency Division Multiplexing) 전송방식을 이용한 음향 통신시스템을 설계한다. 설계된 통신시스템의 성능을 검증하기 위해 여러 통신환경에 대한 비트 오류율과 데이터 전송률을 연산하고 이로부터 서해안에서 긴 지연시간을 가지는 수중 채널과 낮은 Eb/No에서 사용가능한 수중 음향통신 기법을 제안한다.

**핵심용어:** 서해, 수중음향통신, 비트오류율, 데이터 전송률

**ABSTRACT:** This paper proposes an adequate UWA (Underwater Acoustic) communication system of underwater communication network in the Yellow Sea. UWA channel is obtained from Bellhop ray tracing method with Yellow Sea environments. Based on this channel, communication parameters for CDMA (Code Division Multiple Access) and SC-FDM (Single Carrier-Frequency Division Multiplexing) using diversity techniques are calculated. In order to prove the proposed methods, BER (Bit Error Rate) and data rate are obtained using computer simulations and the adequate communication system for long rms delay spread and low Eb/No environments is proposed from the simulation.

**Keywords:** Yellow Sea, UWA(Underwater Acoustic) communication, Bit error rate, Data rate

**PACS numbers:** 43.30.Cq, 43.30.Es

## 1. 서 론

과학 탐사, 상업 탐사, 그리고 국방 분야에서 수중 환경을 관측하는 필요성이 높아지고 있다. 광범위한 수중환경 관측을 위해 분산형 수중 무선 센서 네트워크를 이용하면 편리해진다.<sup>[1]</sup>

미국의 Seaweb<sup>[2,3]</sup>이나 캐나다의 AUSS<sup>[2]</sup>와 같이 네트워크기반의 수중감시체계를 구축하기 위한 연구개발이 활발히 추진되고 있으나 국내에서는 아직

수중 센서 네트워크망이 갖춰져 있지 않다. 특히 서해와 같은 우리나라 천해 환경은 수심이 낮고 음속 구조가 해외와 달라 기존의 수중 센서 네트워크를 구현하기 쉽지 않다.

수중 센서 네트워크를 구현하기 위한 문제점으로 음파의 산란, 굴절, 반사 등에 의해 일어나는 다중경로 전파와 시변 특성이 있다. 수중의 긴 시간 다중경로 채널 특성은 수신단의 보상 알고리즘을 복잡하게 만들고 데이터 전송률을 낮추게 된다.<sup>[3-5]</sup>

이러한 문제를 극복하기 위한 방법으로 CDMA(Code Division Multiple Access)와 SC-FDM(Single Carrier-

<sup>†</sup>Corresponding author: Jaehak Chung (jchung@inha.ac.kr)  
Department of Electronic engineering, Inha University, 100 Inharo, Nam-gu, Inchoen 22212, Republic of Korea  
(Tel: 82-32-860-7421, Fax: 82-32-865-0480)

Frequency Division Multiplexing)이 있다. CDMA 전송 방식은 레이크 수신기를 이용한 시간 다이버시티 효과를 얻음으로써 다중경로 문제에 대처할 수 있고 SC-FDM은 보호 구간삽입을 통해 ISI(Inter-Symbol Interference)를 제거함으로써 BER성능을 높일 수 있다. 또한 수중 센서는 배터리로 작동하므로 전력소비를 최소화해야 한다.<sup>[3,4,6]</sup> 그러므로 서해의 수중 센서 네트워크망을 위해서 서해 수중채널에 적합하고 전력소모가 적은 수중 음향 통신 시스템이 필요하다.

본 논문에서는 한국 서해의 환경의 수중 채널을 모델을 Bellhop 음선 추적 프로그램을 이용하여 만든다. 이 채널을 바탕으로 서해안에서 파워앰프의 백오프(backoff)가 적으면서 다중경로에 효과적으로 대처할 수 있는 전송방식인 CDMA와 SC-FDM방식을 이용한 수중음향 통신시스템을 설계하고 그 성능을 분석하여 서해안에 적합한 통신 방식을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 서해안의 해역 정보를 활용한 채널 모델을 제시하고 III장에서 제시한 채널 모델을 통해 CDMA와 SC-FDM 전송방식을 이용한 수중 통신시스템을 설계한다. 그리고 IV장에서는 설계한 통신시스템의 데이터 전송률과 BER성능을 보이고 적합한 전송방식을 보인다.

## II. 서해 수중통신 채널 모델

서해 수중 음향 네트워크의 물리계층을 설계하기 위하여 서해안 수중통신채널 모델을 구한다. 서해안의 수중음향통신 채널 모델은 서해정점(307-03)에서의 한국해양자료센터(KODC)에서 제공하는 음속 및 수온 정보를 이용하였다. 정점의 위치는 북위 36.94, 동경 126.00이며 관측 일시는 2014년 8월 7일 15시 59분이고 음속 및 수온 정보는 Fig. 1과 같다.<sup>[8]</sup>

본 논문에서 고려하고 있는 수중통신 네트워크는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 수중 센서노드는 해저의 바닥면에 위치하고 수중기지국 해저바닥면으로부터 수직 2m지점, 수평으로 2km지점에 위치한다고 설정하였으며 반송파주파수는 46 kHz, 대역폭은 4 kHz를 사용한다. 해저면의 상태는 해역 정보로부터 밀도가 1.8 g/cm<sup>3</sup>인 모래로 설정하였으며 감쇄계수는 0.9 dB/λ로 설정하였다.

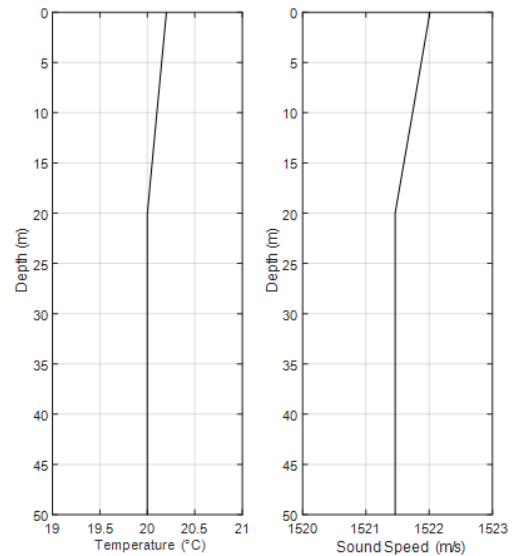


Fig. 1. Temperature and sound speed in the Yellow Sea.

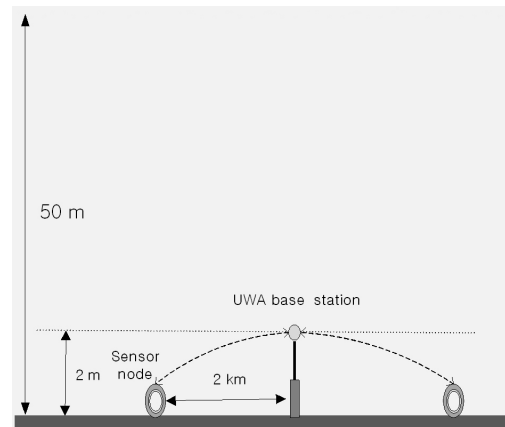


Fig. 2. Scenario of the channel model.

이 환경에서 수중음향통신 채널 임펄스 응답은 Bellhop 음선 추적 프로그램을 이용하여 구했고 이 결과를 Figs. 3과 4에 나타내었다. Fig. 3은 센서노드와 기지국 간의 고유 음선을 나타낸 것이다. 첫 번째 음파가 도착하는데 걸린 지연시간은 1.31s이며 전송 손실은 44.44 dB이다. 최대 확산 지연은 14.78 ms이고 다중경로의 개수는 12개다. 이를 통해 계산된 채널 모델의 실효 확산 지연(rms delay spread)은 1.45 ms이다. 이 값으로 상관 대역폭을 추정할 수 있으며 상관 대역폭은 0.9의 상관 값에서 약 13.79 Hz와 0.5의 상관 값에서는 137.9 Hz로 산출되었다.<sup>[9]</sup> 해류와 파도의 변동에 따르는 최대 도플러확산이 4 Hz라고 가정한다.

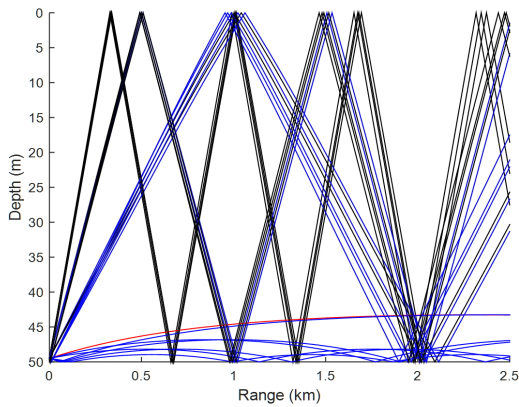


Fig. 3. Eigenray of the channel model.

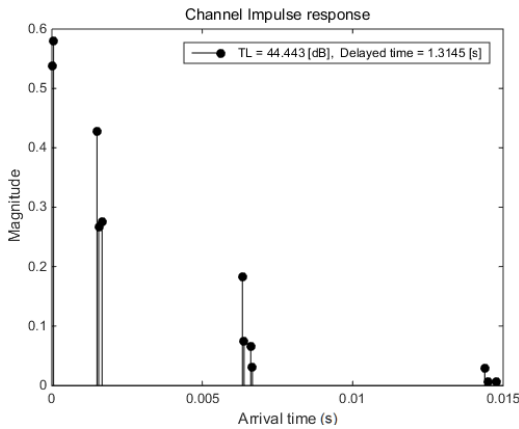


Fig. 4. UWA channel impulse response.

다. 이 값으로부터 상관 시간은 0.25 s를 얻을 수 있다.

### III. 서해 수중통신시스템 전송방식 설계

서해안에서의 수중 통신 네트워크를 위한 수중통신 시스템은 Fig. 4와 같은 긴 지연시간을 갖고 다중 경로 문제를 가지는 채널에 강인한 통신 시스템을 사용해야한다. 그리고 수중센서는 배터리로 동작해야하므로 수중기지국과 노드의 통신시간을 최대한으로 해야한다. 이를 위해 전력 증폭기의 백오프(backoff)가 적은 효율적인 통신방식이 필요하기 때문에 PAPR (Peak to Average Power Ratio)이 적은 단일 반송파 방식을 고려한다. 위의 두 가지 조건을 만족하는 기법은 CDMA와 SC-FDM이다. CDMA는 레이크 수신기를 이용하여 시간영역에서 다이버시티를 얻고 SC-FDM도 다중경로에 의한 주파수 선택 특성을 이용하

여 주파수 다이버시티를 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 위 두 가지의 통신방식을 고려하여 서해에서의 수중통신시스템을 설계한다.

#### 3.1 CDMA 설계

CDMA는 전송하고자하는 신호를 확산인자(SF; spreading factor)에 따른 직교 코드로 스펙트럼 확산시켜서 보낸 후 수신단에서 알고 있는 코드를 역확산(despreading)방식이다. 수신시에 다중경로 신호를 이용한 시간 영역에서 다이버시티를 얻기 위해서 레이크 수신기를 사용한다. CDMA는 단일 반송파 방식이므로 전송하는 데이터의 채널추정을 위해 파일럿 신호를 일정한 데이터 간격마다 삽입한다. 파일럿에서 추정된 채널 값을 인접 파일럿 값과 보간을 통해 전체 채널 값을 추정하는 방식을 사용한다.

서해에서의 CDMA 수중통신을 위한 통신 파라미터로 파일럿의 길이, 파일럿의 간격, 확산인자, 최대 도플러 확산 등을 고려하였다. II장에서 서해 정점에서 추정된 채널의 최대 확산 지연이 14.78 ms이므로 파일럿에서 일어나는 다중 경로 성분들을 모두 추정하기 위해 파일럿의 길이는 최대 확산지연의 약 두 배인 31.8 ms로 정했고 PN시퀀스를 사용하였다. 파일럿 간격은 최대 도플러 확산이 4 Hz인 시변채널에서의 상관시간인 250 ms를 고려해서 설계한다. 그러나 수중환경에서 최대 도플러 확산은 4 Hz보다 적게 일어나는 경우가 많으므로 상관시간 250 ms보다 긴 파일럿 간격도 설정하였다. 그리고 확산인자는 수중통신 대역폭이 협소하므로 확산인자를 크게 하지 못하고 다중 경로 채널 페이딩 효과를 상쇄시킬 수 있는 최소한의 값인 12와 16으로 설정한다. 이 때 CDMA 방식의 데이터 전송률은 다음과 같다.

$$Rate^{CDMA} = \frac{Data\_length \times Bandwidth \times ModOrder}{Frame\_length \times Spreading\_factor}, \quad (1)$$

여기서 ModOrder는 변조기법에 따른 심볼 당 비트를 의미한다. 위의 설계된 값을 이용하여 적용 가능한 수



Fig. 5. Frame structure of CDMA transmission.

중통신 시스템의 성능 분석은 IV장에서 한다. Fig. 5는 설계한 CDMA 전송방식의 프레임 구조를 나타낸 것이다.

### 3.2 SC-FDM 설계

SC-FDM은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송방식을 응용한 방법으로 OFDM 시스템의 양 끝에 FFT(Fast Fourier Transform)와 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)과정을 추가함으로써 단일 반송파 신호의 형태로 전송하는 방식이다. 이러한 방법은 OFDM에 비해 PAPR이 적은 이점을 가지고 있고 OFDM과 같이 주파수 축에서의 1단 선형 등화기를 통해서 간단하게 채널을 추정할 수 있다.

서해에서의 SC-FDM 통신방식 설계는 4 kHz 대역폭을 사용하였을 때 수중 채널의 상관대역폭이 13.79 Hz이므로 512개의 부반송파를 설정한다. 그리고 채널 추정을 위해 2개마다 파일럿을 삽입하였다. 인접 심볼간 간섭을 제거하기 위한 CP의 길이는 최대 확산 지연 14.78 ms를 고려해 16 ms로 설계한다. 또한 SC-FDM에서도 주파수영역에서 다이버시티를 얻어 비트 오류율 성능을 향상시키기 위해 주파수영역 확산인자를 1,2,4,8로 변환시켜 설계한다. 이때 SC-FDM 전송방식의 변조 방식에 따른 데이터 전송률은 다음과 같다.

$$\text{Data Rate}_{SCFDM} = \frac{FFTsize * (pilot\_spacing - 1) * ModOrder}{Symbol\_length * SF * pilot\_spacing}, \quad (2)$$

여기서 *ModOrder*는 변조기법에 따른 심볼당 비트를 의미한다. 여기서 설계된 SC-FDM의 성능 분석을 위해 IV장에서 전산 모의실험을 한다.

## IV. 전산 모의실험

III장에서 설계한 CDMA와 SC-FDM를 통신 시스템에 대한 서해안 정점에서의 비트 오류율과 데이터 전송률을 비교하기 위해 몇 가지 통신 변수를 변화시키며 실험하였다.

### 4.1 CDMA 전송성능 분석

실험에는 Fig. 4의 채널 모델을 사용하였고 4 kHz의 대역폭과 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 변조방식을 사용하였으며 단순 성능 비교를 위해 채널 부호화를 하지 않고 실험하였다. 채널 추정 방법으로는 최소자승추정법을 이용하였다. Table 1은 앞장에서 설계한 파라미터 별로 데이터 전송률을 구한 것을 나타낸 표이다.

Figs. 6과 7에는 Table 1에 대한 실험 결과를 나타내었다. Fig. 6는 최대 도플러 확산이 4 Hz이고 QPSK 변조방식을 사용하였으며 데이터 길이는 채널의 상관

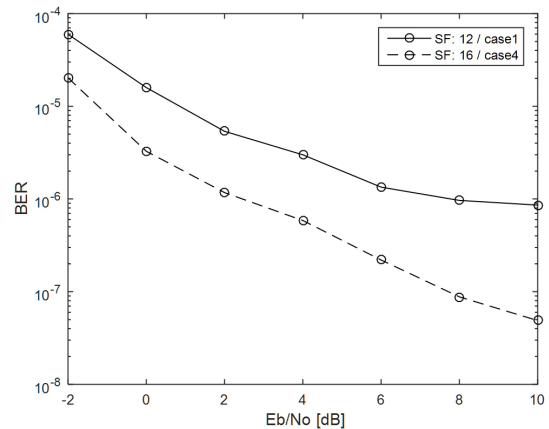


Fig. 6. BER performance of CDMA by spreading factor.

Table 1. Variables of CDMA simulation.

BW	Pilot sequence		SF	Data sequence			Frame size (ms)	Data rate (bps)	BER
	(chip)	(ms)		(symbol)	(chip)	(ms)			
4 kHz	127	31.8	12	85	1020	255.0	286.8	593	case1
				100	1200	300.0	331.8	603	case2
				115	1380	345.0	376.8	610	case3
			16	64	1024	256.0	287.8	445	case4
				75	1200	300.0	331.8	452	case5
				86	1376	344.0	375.8	458	case6

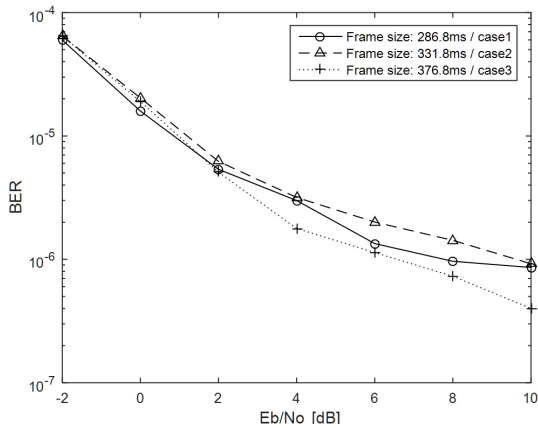


Fig. 7. BER performance of CDMA by frame size.

시간과 비슷한 255 ms로 가정하고 확산 인자에 따른 비트 오류율을 나타낸 그림이다. 12의 확산인자를 사용하였을 때 비트 오류율  $10^{-5}$ 에서는 약 1 dB의  $E_b/N_0$ 에서 보였고 16의 확산인자를 사용하였을 때는 0 dB일 때 이미  $10^{-5}$ 보다 낮은 비트 오류율을 보였다. 확산인자 16을 사용하였을 때 확산인자 12의 경우보다 비트 오류율 성능이 좋았으나 12를 사용했을 때도 전송 가능한 성능을 얻을 수 있음을 보였다.

Fig. 7은 확산인자 12, 최대 도플러 확산이 4 Hz, 그리고 QPSK 변조방식을 사용하였을 때 프레임 길이가 255 ms, 300 ms, 345 ms의 경우에 대한 비트 오류율을 나타냈다. 실험결과 모든 길이에 대해 비트 오류율  $10^{-5}$ 을 만족하는  $E_b/N_0$ 은 약 1.5 dB를 얻었다. 데이터 전송률을 고려했을 때 프레임 길이를 345 ms로 설정해도 전송이 가능함을 보였다.

그러므로 본 실험으로부터 CDMA 파라미터는 확산인자가 12 프레임 길이가 345 ms로 설계했을 때, 약 1.5 dB의  $E_b/N_0$ 에서  $10^{-5}$ 의 비트 오류율과 데이터 전송률은 610 bps를 얻었다.

#### 4.2 SC-FDM 전송성능 분석

SC-FDM의 성능 비교는 512 FFT크기를 사용하고 파일럿 간격을 3개의 부반송파로 하였고 주파수 확산 이득을 얻기 위해 확산인자를 1,2,4,8로 변화시켰으며 변조방식은 QPSK, 16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)에 대해 실행하였다. 실험에는 CDMA와 동일하게 Fig. 3의 채널 모델을 사용하였다. 대역폭은 4 kHz를 사용하였으며 채널 부호화 없이 실험하

Table 2. Variables of SC-FDM simulation.

FFT size	BW (Hz)	Sub-carrier spacing (Hz)	Pilot spacing (subcarriers)	Effective symbol length (ms)	CP size (sample)	CP length (ms)	SC-FDM symbol length (ms)	Spreading	Datarate (bps)		BER	
									QPSK	16QAM	QPSK	16QAM
512	4000	7.81	3	128.0	64	16	144	1	4,741	9,481	case1	case5
								2	2,370	4,741	case2	case6
								4	1,185	2,370	case3	case7
								8	593	1,185	case4	case8

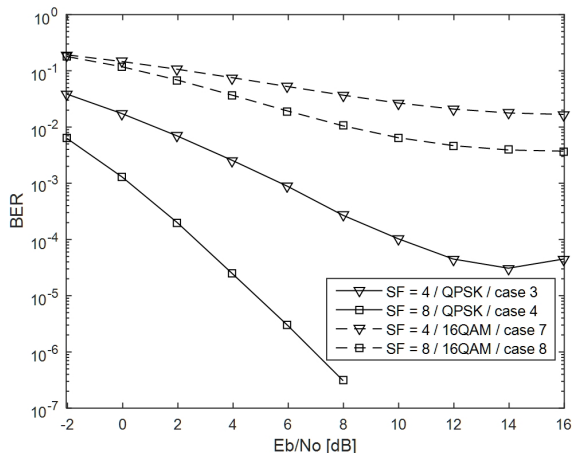
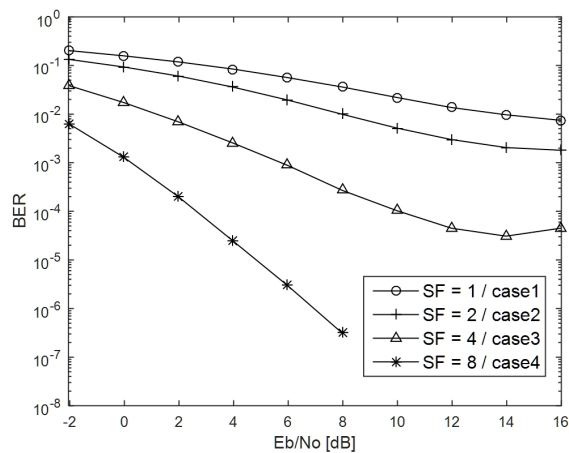


Fig. 8. BER performance of SC-FDM by spreading factor.

Fig. 9. BER performance of SC-FDM by modulation order.

였다. 채널 추정 방법으로 1단 제로포싱 등화기를 이용하였다.

Table 2는 III장에서 설계한 시스템의 확산인자 변화에 따른 데이터 전송률을 나타낸 표이고 Figs. 8과 9는 표에 따른 실험결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 8은 4 Hz의 최대 도플러확산의 환경에서 QPSK 변조 방식을 사용하였을 때 확산인자에 따른 비트 오류율 성능을 나타내었다. 확산인자가 1,2,4인 경우에는 비트 오류율  $10^{-5}$ 을 얻지 못하였고 확산인자 8을 사용하였을 경우 약 5 dB의 Eb/No에서  $10^{-5}$ 의 비트 오류율을 얻었다.

Fig. 9는 확산인자 4와 8을 이용하여 4 Hz의 최대 도플러확산의 환경일 때 변조방식에 따른 비트 오류율 성능을 나타내었다. 실험 결과 16Q AM을 사용하였을 때는 확산인자를 8인 경우에도  $10^{-5}$ 의 비트오류율 성능을 얻을 수 없었다. 그러나 추후 채널부호화 방식이 추가되면 비트오류율 성능이 개선되므로 서해안 수중 환경에서 SC-FDM에서 16QAM 변조방식도 사용가능할 것으로 사료된다.

SC-FDM의 경우  $10^{-5}$ 의 비트오류율을 만족하는 통신 파라미터는 QPSK 변조방식과 확산인자 8을 사용하였을 때이고 이 때 약 5 dB의 Eb/No에서 비트 오류율  $10^{-5}$ 을 얻었으며 데이터 전송률은 593 bps를 나타내었다.

그러므로 본 논문에서 제안된 수중음향통신 방식은 서해안 수중의 긴 지연 채널 환경에서도 데이터 전송이 가능함을 보였다. 낮은 Eb/No에서도  $10^{-5}$ 의 비트 오류율을 보였기 때문에 적은 전력으로도 데이터 전송이 가능하다.

## V. 결 론

본 논문에서는 서해안에서 Bellhop 음선 추적 프로그램을 이용하여 수중 음향 채널을 모델링 하였다. 이 채널을 이용해서 CDMA 방식과 SC-FDM을 통한 수중 통신시스템을 설계하고 전산 모의실험을 수행하여 서해안에서의 통신방식을 제안하였다. 실험 결과 서해안 환경에서 수중 음향통신을 할 경우 4 kHz 대역폭에서 CDMA는 프레임 길이 376 ms, 확산 인자가 12인 경우의 비트 오류율  $10^{-5}$ 을 만족하는 Eb/No

은 2 dB와 데이터 전송률 610 bps를 얻었다. SC-FDM에서는 512 FFT 크기를 사용하고, QPSK 변조, 주파수 확산인자로 8을 사용하였을 때 비트 오류율  $10^{-5}$ 을 만족하는 Eb/No는 5 dB였으며 전송률 593 bps를 얻었다. 그러므로 제안된 수중통신 방식이 긴 지연 시간 채널과 낮은 Eb/No에서 데이터를 전송할 수 있음을 보였다.

## 감사의 글

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(분산형 수중 관측 제어망 개발).

## References

1. J. H. Cui, J. J. Kong, M. Gerla, and S. Zhou, "The challenges of building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications," *IEEE Network*, **20**, 12-18 (2006).
2. J. Rice, "SEAWEB acoustic communication and navigation networks," In Proc. Int. Conf. Underwater Acoustic Measurement: Technologies & Results (2005).
3. J. Rice and D. Green, "Underwater communication and networks for the US Navy's Seaweb program," *IEEE Int. Conf. on Sensor Tech. and Applications*, 715-722 (2008).
4. J. A. Catipovic, "Performance limitations in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Ocean. Eng.* **15**, 205-216 (1990).
5. D. H. Choi, H. S. Kim, N. R. Kim, S. I. Kim, and J. H. Chung, "Coherence bandwidth and coherence time for the communication frame in the underwater of east sea" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **29**, 365-373 (2010).
6. S. H. Lee and C. H. Choi, "The R&D trends of underwater sensor network for network-based underwater surveillance" (in Korean), *Proc. of Symposium of KICS*, 602-603 (2011).
7. M. Murad, A. A. Sheikh, M. A. Manzoor, E. Felemban, and S. Qaisr, "A survey on current underwater acoustic sensor network applications," *Int. J. of Comp. Theory and Eng.* **7**, 51-56 (2011).
8. Korea Oceanography Data Center Marine observation data, [http://kocd.nfrdi.re.kr/page?id=obs\\_04\\_01](http://kocd.nfrdi.re.kr/page?id=obs_04_01), 2014.
9. B. Sklar, *Digital Communications Fundamentals and applications* (Prentice-Hall, New Jersey, 2004), pp. 960-961.

## 저자 약력

### ▶ 강 지 웅 (Jiwoong Kang)



2015년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사  
 2015년 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 수중통신, OFDM시스템, 5G 이동통신

### ▶ 김 현 수 (Hyeonsu Kim)



2008년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사  
 2010년 2월: 인하대학교 전자공학과 석사  
 2010년 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 박사과정  
 <관심분야> 수중통신, MIMO, SDR

### ▶ 안 종 민 (Jongmin Ahn)



2015년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사  
 2015년 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 수중통신, OFDM시스템, 5G 이동통신

### ▶ 정 재 학 (Jaehak Chung)



1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 학사  
 1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 석사  
 2000년: University of Texas at Austin 전기 전산학과 박사  
 2000년 ~ 2001년 Post doctoral fellow, University of Texas at Austin  
 2001년 ~ 2005년 삼성종합기술원 수석 연구원  
 2005년 ~ 현재 인하대학교 정교수  
 <관심분야> Cognitive radio, 차세대 무선 이동 통신, MIMO-OFDM, UWB