

# 서해 실효역에서 수중 채널 변화에 따른 OFDM 기반 수중 음향 통신 시스템의 성능 분석 연구

조용호\*, 이태석\*, 고크림<sup>o</sup>

## Performance Analysis of OFDM-Based Underwater Communication Systems for Time-Varying Underwater Channel in Western Sea of Korea

Yong-Ho Cho\*, Tae-Seok Lee\*, Hak-Lim Ko<sup>o</sup>

### 요 약

최근 수중에서의 고속 데이터 전송을 위해 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)을 기반으로 하는 수중 음향 통신 방식에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 수중 채널은 해수면의 산란, 해류의 이동 등으로 인해 시간과 주파수 측면에서 큰 선택성을 가지게 된다. 본 논문에서는 고정된 장소에서 24시간에 이르는 장시간 실측을 통해, 수중 채널의 Doppler 효과와 다중경로에 의한 수중 음향 OFDM 시스템의 성능을 분석하였다. 성능 분석 결과 실험이 수행된 환경에서는 수중 채널의 주파수 선택성이 시간 선택성보다 수중 음향 OFDM 시스템의 성능에 더 큰 영향을 미침을 확인하였다. 특히 채널의 지연 확산값이 cyclic prefix (CP)의 길이를 초과할 경우 발생하는 인접 심볼간 간섭(inter-symbol interference; ISI) 때문에 큰 성능 열화가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : underwater, OFDM, acoustic communications

### ABSTRACT

Recently, OFDM-based underwater acoustic communication systems have been actively studied for high-speed data transmission in underwater acoustic communications. The underwater channel has severe selectivity in terms of time and frequency due to various environmental factors such as scattering of sea surface and movement of ocean current. In this paper, we investigate the performance of underwater acoustic (UWA) OFDM system for time-varying underwater channels based on sea experiment over 24 hours. It is verified by the experimental analysis that the performance of the UWA OFDM system is affected mainly by the time and frequency selectivity of the channel. Especially, the underwater channel with the delay spread exceeding the length of a cyclic prefix induces considerable degradation in performance of the UWA OFDM system.

※ 본 연구는 2018년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(분산형 수중 관측·제어망 개발)

• First Author : (ORCID:0000-0002-7550-206X)Hoseo University Oceanic IT Convergence Research Center, yhcho@hoseo.edu, 정희원

<sup>o</sup> Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-4811-1116)Hoseo University Department of Information and Telecommunication Eng., hlko@hoseo.edu, 정희원

\* (ORCID:0000-0002-3971-0777)Hoseo University Department of Information and Telecommunication Eng., ltaeseok88@naver.com, 학생희원

논문번호 : 201808-236-C-RN, Received August 7, 2018; Revised September 27, 2018; Accepted September 27, 2018

## I. 서론

해양 자원 확보를 위한 개발 탐사, 수중 환경 관측, 해체 감시, 해양 방위 등의 중요성이 높아지면서 수중 통신 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이로 인하여 수중 통신망에 대한 요구도 높아지고 있다<sup>[1,2]</sup>. 최근 수중 통신망 연구는 수중 유선통신에서 수중 무선통신으로 발전해나가는 과정에 있다. 현재 해외에서는 유럽의 여러 국가들과 미국이 컨소시엄을 이루어 ‘SUNRISE 프로젝트’라는 수중통신망 개발 연구를 활발히 진행 중이다. 중국 또한 NSFC (natural science foundation of china)의 국가 주도적인 지원을 통해 각 대학 및 연구소에서 수중통신망에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다.

최근 수중 통신망의 성능 향상을 위해 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기반 수중 통신 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다<sup>[3-5]</sup>. 논문 [3]에서는 원활한 수중 음향 OFDM 시스템을 위해 Doppler 효과를 완화시키는 기법을 제안하였다. 논문 [4]에서는 수중 음향 OFDM 시스템에서 변조 방식과 송신 파워를 채널 상황을 고려해 적응적으로 변화시키는 기법을 제안하였다. 논문 [5]에서는 수중 음향 OFDM 시스템을 위한 적응적 변조 및 코딩 기법을 제안하였다.

OFDM은 주파수 선택적인 채널에 강점이 있어 다수의 다중 경로를 갖는 수중 채널 환경에서 보다 원활한 통신을 수행할 수 있게 한다. OFDM 시스템은 각 OFDM 심볼 앞에 삽입되는 CP (Cyclic Prefix)의 도움으로 심한 주파수 선택적 특성을 갖는 채널을 주파수 비 선택적 페이딩 채널로 변환할 수 있다. 이로 인하여 수중 통신에서 등화기의 복잡도를 낮출 수 있어 보다 안정적인 통신 성능을 기대할 수 있다. 등화 성능의 향상을 통해 OFDM은 고속 데이터 전송에 있어서도 장점을 가진다.

반면 단일 반송파 전송 방식에서는 고속의 데이터 전송을 위해 심플 주기를 짧게 한다는 것은 곧 사용하는 대역폭이 넓어진다는 것을 의미한다. 심플의 전송 주기가 짧아질수록 샘플링된 신호의 관점에서 전송 채널의 최대 지연 확산(maximum excess delay spread)은 상대적으로 길어지는 효과가 나타나 채널에 의한 ISI의 영향이 증가한다. 즉, 심플 전송주기가 짧아질수록 채널의 주파수 선택적인 특성이 커지기 때문에 단일 반송파 전송 방식으로는 넓은 대역폭을 활용하는 고속 데이터 전송이 어렵다. 따라서 OFDM은 단일 반송파 방식에 비해 수중환경에서의 고속 데이터 전송에

적합하다 할 수 있다.

육상 통신에 비하여 수중통신을 어렵게 하는 가장 큰 요인은 수중 채널 특성이다. 해양에서 음파를 사용하여 통신을 수행할 경우 해양의 수중 매질은 음향 도파관(acoustic waveguide)의 역할을 하게 된다. 이 경우 해양환경의 변동성과 그에 따른 음파와 매질의 간섭에 의해 수중통신 채널의 변동이 발생한다. 또한 시간에 따라 변하는 해면과 해저지형에 의한 해면 반사파와 해저면 반사파는 다양한 다중경로를 생성한다<sup>[6]</sup>. 이러한 신호의 시간적인 확산(신호의 산란)은 ISI (inter-symbol interference)의 영향을 증가시킴으로써 통신 성능의 열화를 야기한다. 또한 파도나 해류변화로 인한 송수신단의 상대적인 속도 변화는 Doppler 천이와 Doppler 확산을 발생시킨다<sup>[6]</sup>. 빠르게 변하는 시변 채널을 겪게 되면 신호의 신호 대 잡음비(signal to noise ratio; SNR)를 아무리 증대시키더라도 통신 성능에 있어 줄일 수 없는 오류율이 유발된다<sup>[6]</sup>. 이렇게 주파수 선택적이며 빠른 시간 페이딩 현상이 발생하는 수중 채널은 육상 통신 대비 수중 통신의 어려움을 크게 증가시킨다.

본 논문에서는 수중 채널의 변화가 수중 음향 OFDM 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 17년 7월 5일부터 6일에 걸쳐 약 24시간 동안 수중 음향 OFDM 시스템의 성능을 측정하였다. 수중 채널의 변화는 최대 지연 확산, root-mean-square (RMS) 지연 확산, Doppler 천이, 그리고 Doppler 확산의 네 가지 지표를 사용하였고, 이를 기반으로 시간에 따른 수중 음향 OFDM 시스템의 성능을 분석하였다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 수중 음향 OFDM 시스템의 성능 분석을 위해 그림 1과 같은 송출 신호를 고려하였다. 송출 신호는 tone 신호, HFM (hyperbolic frequency modulation) 신호, Zadoff-Chu 신호, 그리고 다수의 OFDM 심볼들로 구성된다. 여기서 하나의 비트 오류율(bit error rate; BER)을 얻기 위해 사용된 OFDM 프레임은 6.75초만큼의 길이를 가지며 이는 OFDM 심볼 54개에 해당한다. 송출 신호의 가장 앞부분에는 tone

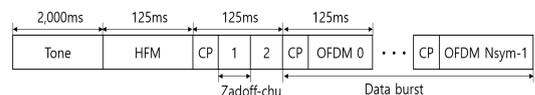


그림 1. 송출 신호 구조  
Fig. 1. Data transmission format

신호를 배치하여 Doppler의 확산 정도와 천이 정도를 추정하였다. 첫 번째 프리앰블은 Doppler에 둔감한 HFM 신호를 사용하여 시간 동기를 검출하는데 사용하였다. 두 번째 프리앰블은 두 번 반복되는 Zadoff-Chu 신호를 사용하여 CFO (carrier frequency offset) 값을 추정하고 보정하기 위해 사용하였다.

송신단에서 tone 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$x_{Tone} = Re\{e^{j2\pi f_0 t}\} \quad (1)$$

여기서 tone 신호의 반송 주파수는 12kHz를 사용하였다.

송신단에서 HFM 신호는 다음과 같이 표현된다<sup>[7]</sup>.

$$x_{HFM}(l) = \exp\left(j2\pi\left(\frac{\ln(\alpha l + (1/f_{\min}))}{\alpha}\right)\right) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{T f_{\max} f_{\min}} \quad (3)$$

여기서 T는 HFM 신호의 길이를 의미한다. 본 연구에서는  $f_{\min}$ 과  $f_{\max}$ 가 각각 2kHz와 6kHz의 값을 가진다.

두 번째 프리앰블  $x_p(n)$ 는 다음과 같이 표현된다<sup>[8]</sup>.

$$x_p(n) = \frac{1}{N_{FFT}} \sum X(k) \exp\left(j\frac{2\pi}{N}kn\right) \quad (4)$$

$$X(k) = \begin{cases} x_{ZC}(i), & k = \text{even}, N_{GB} < k < N_{FFT} - N_{GB} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$x_{ZC}(i) = \exp\left(j\frac{\pi u}{N_{ZC}}i^2\right), \quad i = 0, 1, \dots, N_{ZC} - 1, N_{ZC} = 199 \quad (6)$$

여기서  $N_{ZC}$ ,  $N_{GB}$ ,  $N_{FFT}$ 는 각각 Zadoff-Chu 신호의 길이, 주파수 도메인에서의 가드구간 길이, FFT (fast Fourier transform) 연산의 크기를 의미한다. u는 ZC 신호의 root index를 의미한다.

다음으로 수신단에 대한 상세 내용을 기술한다. 수중 채널의 시간 선택적인 특성은 Doppler 전력 스펙트럼 밀도 (power spectral density)를 통해 확인할 수 있다<sup>[9]</sup>. Doppler 스펙트럼은 수신된 신호를 주파수 영역에서 Doppler 주파수 천이에 대한 함수로 표현한 것이

다. 음파의 낮은 전달 속도로 인하여, 육상 통신 등에 비하여 수중 통신은 Doppler에 보다 더 취약하게 된다. 또한 해류 등의 영향도 전달 신호에 Doppler 효과로 인한 큰 영향을 줄 수 있다<sup>[6]</sup>. 따라서 Doppler의 추정과 보상은 수중통신에서 큰 중요성을 갖는다.

그림 2는 수신한 tone 신호의 Doppler 스펙트럼을 나타낸다. 그림 2를 보면 수중 채널에서 발생하는 Doppler 확산 효과 때문에 수신 tone 신호에 주파수 천이 현상과 주파수 확산 현상이 발생함을 확인할 수 있다. 이로부터 Doppler 확산 정도와 중심 주파수로부터의 천이 정도의 추정이 가능하다<sup>[10]</sup>. Doppler 확산 추정값  $\tilde{f}_{spread}$ 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\tilde{f}_{spread} = \arg \text{last}\{P_{PSD}(f) > \lambda_{PSD} \text{RIGHT2}\} \quad (7)$$

$$P_{PSD}(f) = 10 \log_{10}(|a_f(f)|^2 / \max|a_f(f)|^2) \quad (8)$$

식 (8)에서  $a_f(f)$ 는 수신 tone 신호의 스펙트럼 값을 의미하며,  $P_{PSD}(f)$ 와  $\lambda_{PSD}$ 는 각각 정규화된 전력 값과 Doppler 확산값의 추정을 위한 문턱값을 의미한다. 추정된 Doppler 확산값을 바탕으로 Doppler 천이  $\tilde{f}_{shift}$ 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\tilde{f}_{shift} = \arg \text{first}\{P_{PSD}(f) > \lambda_{PSD}\} + \tilde{f}_{spread} \quad (9)$$

수중 채널의 주파수 선택적인 특성은 채널 임펄스 응답(channel impulse response; CIR)을 통해 확인할

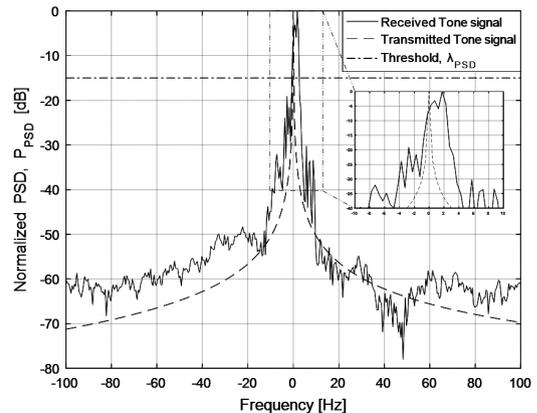


그림 2. 수신 tone 신호의 Doppler 스펙트럼 ( $\lambda_{PSD} = 15dB$ )  
Fig. 2. Doppler spectrum of the received tone signal ( $\lambda_{PSD} = 15dB$ )

수 있다<sup>9)</sup>. HFM 신호를 통해 시간 동기화를 수행한 후, 수신된 HFM 신호를 이용해 채널 임펄스 응답을 추정한다. 채널 임펄스 응답의 추정은 다음과 같이 나타난다.

$$\tilde{h}(l) = \sum_{\tau} r(l+\tau)x_{HFM}^*(l) \quad (10)$$

여기서  $r(l)$ 과  $\tau$ 는 각각 수신된 신호와 시간 동기 를 통해 얻어진 신호의 시작점을 의미한다.

그림 3에 실측 실험으로부터 얻은 서로 다른 특성을 가지는 채널 임펄스 응답을 나타내었다. 최대 지연 확산값은 수신된 첫 신호 성분과 마지막 신호 성분과의 시간 차이를 의미하며, 정규화의 기준이 되는 채널 탭 과 비교하여 문턱값을 기준으로 추정된 마지막 신호 성분의 시간 차이를 통해 도출한다. 문턱값은 일반적으로 가장 큰 신호 성분보다 10~20dB 정도 작은 값으로 설정한다<sup>9)</sup>. 최대 지연 확산값의 추정은 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{\tau}_{\max} = \arg \text{last}\{P_{CIR}(l) > \lambda_{CIR}\} \quad (11)$$

$$P_{CIR}(l) = 10\log_{10}(|\tilde{h}(l)|^2 / \max|\tilde{h}(l)|^2) \quad (12)$$

여기서  $P_{CIR}(l)$ 과  $\lambda_{CIR}$ 은 각각 정규화된 전력값과 문턱값을 의미한다.  $\tilde{\tau}_{\max}$ 은 추정된 최대 지연 확산값 을 의미한다. 최대 지연 확산값은  $\lambda_{CIR}$  값과  $P_{CIR}(l)$ 에 따라 다른 값을 가지게 된다.

오직 최대 초과 지연만이 신호의 주파수 선택적인 특성을 나타내는 최선의 지표는 아니다. 그 이유는 최 대 초과 지연이 문턱값을 넘어서는 각 다중 경로의 크

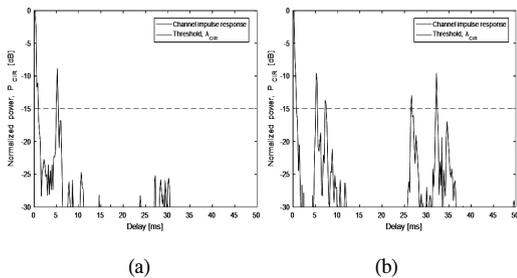


그림 3. 수중 채널을 거친 수신 신호의 채널 임펄스 응답 ( $\lambda_{CIR} = 15dB$ ) (a) 최대 지연 시간이 CP의 길이(22.6ms)를 넘어서지 않는 경우 (b) 최대 지연 시간이 CP의 길이 (22.6ms)를 넘어서는 경우  
Fig. 3. The channel impulse response of the received signal through the underwater channel ( $\lambda_{CIR} = 15dB$ )

기는 고려하지 않기 때문이다. 다른 지표로는 RMS(Root-Mean-Square) 지연 확산값을 사용한다. RMS 지연 확산값은 다음과 같이 정의된다<sup>9)</sup>.

$$\tilde{\sigma}_{\tau} = \sqrt{\tau^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (13)$$

여기서  $\tilde{\sigma}_{\tau}$ 는 2차 중심 모멘트의 제곱근으로써 RMS 지연 확산값을 의미한다.  $\bar{\tau}$ ,  $(\bar{\tau})^2$ ,  $\tau^2$ 는 각각 평균 초과 지연, 평균의 제곱값, 2차 모멘트값을 의미한다.

두 번 반복되는 패턴의 Zadoff-Chu 신호의 상관 특성을 이용하여 변화된 위상을 통해 소수배 CFO 값을 추정 후 보상한다. 두 번 반복되는 Zadoff-Chu 신호 기반 소수배 CFO 추정은 다음과 같다<sup>11)</sup>.

$$\hat{\epsilon} = \frac{D}{2\pi} \text{angle} \left( \sum_{i=0}^{N_{FFT}/D-1} r^*(i)r(i+N_{FFT}/D) \right) \quad (14)$$

여기서 D는 반복되는 패턴 수를 의미한다.

그림 4에 시간 축에서의 OFDM 심볼 구조를 나타 내었다. 본 논문에서 사용된 수중 음향 OFDM 시스템 은 54개의 심볼로 구성되며, 각 심볼은 125ms의 길이를 가진다. CP 길이는 기존 연구 결과에 기반하여 22.6ms로 설정하였다<sup>12-14)</sup>.

그림 5에 주파수 축에서의 OFDM 부반송파 구조가 나타낸다. OFDM 심볼은 여러 부반송파로 구성되며, 이 때 부반송파의 개수는 FFT 크기에 의해 결정된다. 데이터 부반송파는 데이터의 할당을 위해 사용되며, 파

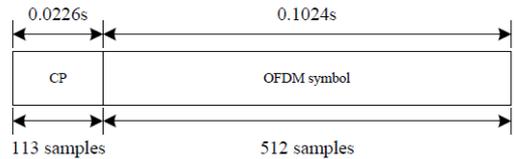


그림 4. 시간 축에서의 OFDM 심볼 구조  
Fig. 4. OFDM symbol structure on time domain

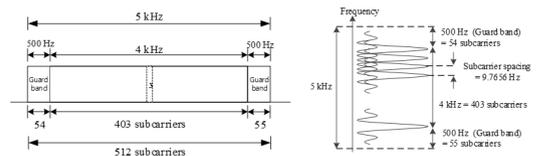


그림 5. 주파수 축에서의 OFDM 부반송파 구조  
Fig. 5. OFDM subcarrier configuration in the frequency domain

일릿 부반송파는 채널, SNR 등 다양한 값들을 추정하기 위해 필요한 파일럿이 할당된다. 널 (NULL) 부반송파는 전송이 없는 보호대역을 위해 사용된다. 그리고 주파수 축의 OFDM 구조에서 가운데에 DC 반송파가 배치된다.

그림 6에 수중 음향 OFDM 시스템의 파일럿 할당 구조가 나타난다. OFDM 변조 방식을 사용하는 많은 시스템에서는 송수신기간 채널 추정 및 여러 목적으로 일부 부반송파에 그림 6과 같은 구조로 파일럿을 배치하여 전송한다<sup>[17,18]</sup>. 이 때 주파수와 시간 영역에서 파일럿 간격은 각각 채널의 주파수와 시간 선택성에 기반하여 설정된다. 주파수 영역에서의 파일럿 신호간의 간격은 다음 식을 만족해야 한다<sup>[19]</sup>.

$$S_f \leq 1/\tilde{\tau}_{\max} \quad (15)$$

여기서  $\tilde{\tau}_{\max}$ 는 채널의 최대 지연 확산값을 나타낸다. 상관 대역폭은 여러 근사 관계식이 있지만  $\tilde{\tau}_{\max}$ 의 역수로도 근사값을 구할 수 있다<sup>[9]</sup>. 서해 천해역에서의 기존 연구 결과 선박 간 거리 2km 지점에서 70.8Hz의 상관대역폭을 확인하였다<sup>[13]</sup>. 실측에 사용된 수중 음향 OFDM 시스템의 대역폭은 5kHz이다. 부반송파는 전체 512개가 사용되며 따라서 부반송파의 간격은 9.7656Hz가 된다. 만일 주파수 영역에서 파일럿 간격이 4일 경우 파일럿 신호의 간격  $S_f$ 는 39.1Hz가 된다.

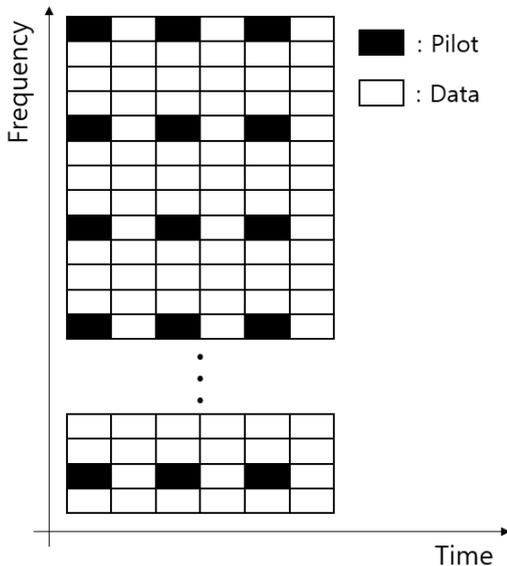


그림 6. OFDM 시스템의 파일럿 할당 구조  
Fig. 6. Structure of pilot allocation for the OFDM system

따라서 파일럿 간격이 4보다 작거나 같아야 식 (15)를 만족할 수 있다.

시간 영역에서의 파일럿 신호간의 간격은 다음 식을 만족해야 한다<sup>[19]</sup>.

$$S_t \leq 1/\tilde{f}_{spread} \quad (16)$$

여기서  $\tilde{f}_{spread}$ 는 Doppler 확산값을 나타낸다. 상관 시간은 여러 근사 관계식이 있지만  $\tilde{f}_{spread}$ 의 역수로도 근사값을 구할 수 있다<sup>[9]</sup>. 서해 천해역에서의 기존 연구 결과 선박 간 거리 2km 지점에서 1.148sec의 상관 시간을 확인하였다<sup>[13]</sup>. 실측에 사용된 수중 음향 OFDM 시스템은 심볼마다 125ms의 길이를 가진다. 따라서 시간 영역에서 파일럿 간격을 2만큼 설정한다면 파일럿 신호의 간격  $S_t$ 는 250ms가 된다. 이에 따라 상관시간보다  $S_t$ 의 수치가 작으므로 시간 영역에서 2만큼의 파일럿 간격이 식 (16)을 만족함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 기존 연구 결과를 바탕으로 파일럿 간격을 주파수 영역과 시간 영역에서 각각 4, 2로 설정하였다<sup>[12-16]</sup>.

그림 7에 전체적인 수중 음향 OFDM 시스템의 블록 다이어그램이 나타난다. 송신하고자 하는 데이터 비트열은 채널 코딩과 인터리빙 과정을 거친 후 변조 과정을 통해 복소 심볼로 변환된다. 변조된 복소 심볼은 반복 전송 과정을 통해 주파수와 시간 축에서 반복된다. 그 후 심볼은 변조 과정을 통해 시간 축 신호로 최종적으로 변환된다. 마지막으로 DAC와 아날로그 부를 거쳐 송신 센서를 통해 수중으로 전송된다.

이후 수신단에서는 CP를 제거한 후에 신호로부터 데이터를 검출한다. 본 논문에서 채널 추정 방식은 선형 보간법을 사용하였다. FFT 연산 후 파일럿 부반송파를 통해 추정된 채널에 대하여 보상을 수행한다. 그 후 변조 심볼의 복조, 다이버시티 합성, 채널 디코딩을 거쳐 수신 비트열을 검출한다. 수신 비트열과 송신 비트열을 비교하여 BER을 통해 수중 음향 OFDM 시스템의 성능을 확인한다.

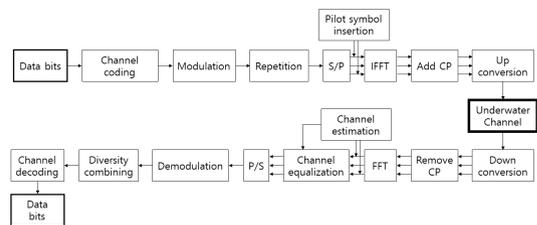


그림 7. OFDM 시스템 블록도  
Fig. 7. OFDM system block diagram

### III. 실험역 측정 환경

수중 채널의 변화에 따른 수중 음향 OFDM 시스템의 성능을 분석하기 위해 17년 7월 5일에서 7월 6일에 걸쳐 인천광역시 덕적도 인근 해역에서 실험역 실험을 수행하였다. 4분 간격으로 수중 음향 OFDM 시스템의 파라미터(modulation, channel coding, coding rate)를 변경하며 그림 1의 신호를 송출하였다.

그림 8에 실험이 수행된 측정 위치가 나타난다. 실험역 측정이 수행된 인천광역시 인근 해역에서의 측정 당시 송신 선박과 수신 선박의 GPS 좌표는 각각 37°13'28.2"N 126°12'12.0"E 였으며, 수신 선박의 좌표는 37°14'22.7"N 126°12'55.1"E였다. 송수신 선박 사이의 거리는 GPS를 이용하여 2km의 거리를 이격시킨 후 닻을 내려 송신 선박과 수신 선박의 위치를 고정하였다.

그림 9에 실험역 측정 시나리오를 나타내었다. 송신용 트랜스듀서와 수신용 하이드로폰의 경우 각각 수심 20m와 5m의 위치에 각 수중 센서를 고정시켰다. 송신용 트랜스듀서는 Neptune 사의 T353을 사용하였으며 수신용 하이드로폰은 B&K 사의 8103 모델을 사용하였다. 선박의 위치가 고정된 인천시 옹진군 덕적도 인



그림 8. 측정 위치 개관  
Fig. 8. An overview of the experiment location

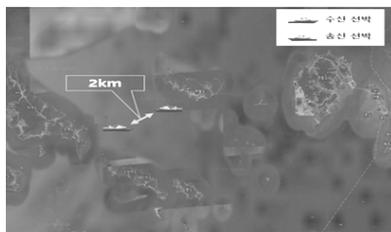


그림 9. 측정 시나리오  
Fig. 9. Scenario of experiment

근 해역의 수심은 해양조사원이 제공하는 수심도를 활용한 결과 25~40m의 수심을 확인하였다.

실험 당시 날씨는 맑은 가운데 새벽에는 안개가 끼는 경우가 있었다. 국립해양 조사원의 수직조류도를 바탕으로 실험 당시의 조류의 세기와 방향을 확인하였다. 7월 5일 15시에 실험을 시작하였을 때 송신 선박에서 수신 선박의 방향으로(남서) 조류가 발생하였다. 실험 시작 후 3시간이 경과한 18시부터 조류가 점점 약해지다가 21시 30분부터 반대로 수신 선박에서 송신 선박의 방향으로(북동) 조류가 발생함을 확인하였다. 21시 30분으로부터 조류의 세기가 점점 강해지다가 4시간 후인 7월 6일 3시 30분부터 다시 송신 선박에서 수신 선박의 방향으로(남서) 조류가 발생함을 확인하였다. 3시 30분으로부터 조류의 세기가 점점 강해지다가 6시간 30분 후인 10시부터 다시 조류의 방향이 반대(북동)로 발생함을 확인하였다. 그리고 실험을 계속 진행하여 7월 6일 15시에 실험을 마무리하였다.

### IV. 성능 분석

본 논문에서는 수중 채널이 수중 음향 OFDM 시스템 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해 채널의 최대 지연 확산값, RMS 지연 확산값, Doppler 천이값, 그리고 Doppler 확산값을 추정하였다. 채널 특성값에 따라서 다른 코드율과 반복 전송 횟수를 갖는 수중 음향 OFDM 시스템의 성능을 분석하였다. 세가지 서로 다른 수중 음향 OFDM 시스템의 파라미터가 표 1에 나타난다.

측정에 사용된 수중 음향 OFDM 시스템은 12kHz의 중심 주파수를 가지며 4kHz의 유효 대역폭을 가진다. CP는 22.6ms의 길이를 가진다. 표 2에 OFDM 공통 파라미터를 나타내었다.

본 논문에서는 문턱값을 15dB로 설정하여 지연 확산값과 Doppler 수치를 추정하였다. 그림 10에 실험역 실험 경과 시간에 따라 추정된 채널 특성값 및 수중 음향 OFDM 시스템의 성능을 나타내었다. 그림 10에서 (a), (b), (c), (d)는 각각 시간에 따른 최대 지연 확산값,

표 1. 서로 다른 3가지 경우에 대한 수중음향 OFDM의 파라미터  
Table 1. Parameters of UWA OFDM for 3 different cases

case	Modulation	Channel coding	Coding rate	Repetition
1	QPSK	Turbo coding	1/3	4(Freq.) / 1(Time)
2			1/2	2(Freq.) / 3(Time)
3			1/2	8(Freq.) / 1(Time)

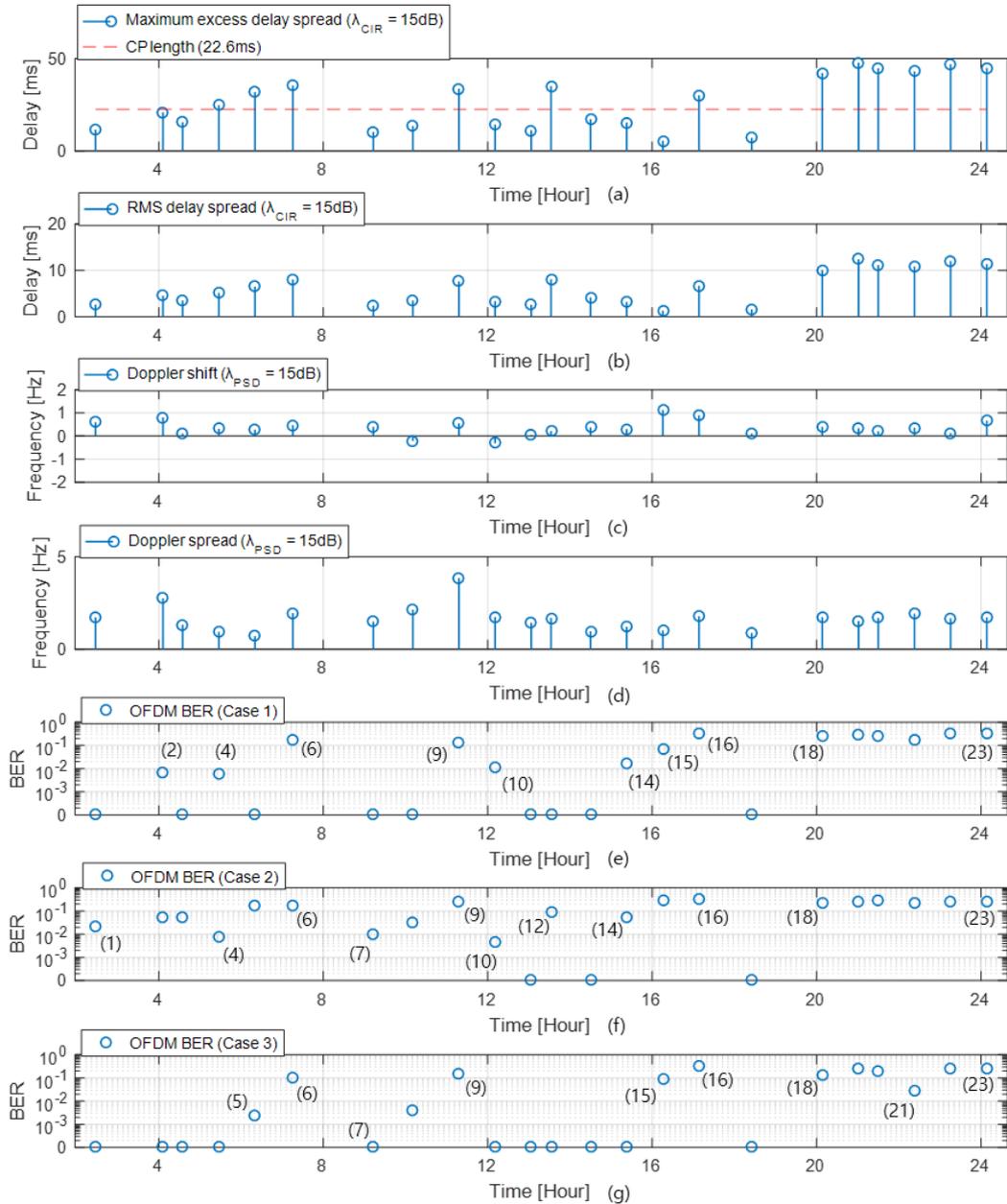


그림 10. 장시간 실험에서의 채널로 인한 영향과 OFDM 성능의 비교  
 Fig. 10. Comparison of degree of influence by channel and OFDM Performance over time

RMS 지연 확산값, Doppler 천이값, 그리고 Doppler 확산값이며, (e), (f), (g)는 각각 표 1의 case 1, case 2, case 3에 해당하는 OFDM 시스템의 BER 성능이다.

그림 10의 (a)와 (e,f,g)를 보면 최대 지연 확산의 길이가 CP 길이(22.6ms)를 넘을 때 수중 음향 OFDM 시스템 성능이 크게 저하됨을 알 수 있다. (e)의 2, 4,

6, 9, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23번 샘플, (f)의 4, 5, 6, 9, 12, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23번 샘플, (g)의 5, 6, 9, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23번 샘플의 경우 최대 지연 확산의 길이가 CP의 길이를 넘은 경우이며, 이때 수중 음향 OFDM 시스템 성능이 크게 저하됨을 볼 수 있다. (b)와 (e,f,g)를 보면 (e)의 2, 4, 6, 9, 16, 18,

표 2. OFDM 공통 파라미터  
Table 2. OFDM common parameters

Parameter	Value
Carrier frequency	12kHz
Active bandwidth	4kHz
FFT size	512
Useful subcarrier	400
DC subcarrier	3
Guardband	54(left), 55(right)
OFDM symbol length	0.1024sec
CP length	0.0226sec

19, 20, 21, 22, 23번 샘플, (f)의 4, 5, 6, 9, 12, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23번 샘플, (g)의 5, 6, 9, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23번 샘플에서 RMS 지연 확산값이 커짐에 따라 수중 음향 OFDM 시스템 성능이 저하됨을 볼 수 있다.

(c)와 (e,f,g)에서 Doppler 천이값이 수중 음향 OFDM 시스템 성능에 영향을 미침을 확인할 수 있다. (e)의 2, 4, 6, 9, 10, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 23번 샘플, (f)의 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 23번 샘플, (g)의 5, 6, 8, 9, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 23번 샘플을 보면 Doppler 천이값이 커짐에 따라 수중 음향 OFDM 시스템 성능이 저하됨을 볼 수 있다. (d)와 (e,f,g)에서 Doppler 확산값이 수중 음향 OFDM 시스템 성능에 영향을 미침을 확인할 수 있다.

(e)의 2, 4, 6, 9, 10, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23번 샘플, (f)의 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23번 샘플, (g)의 6, 8, 9, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23번 샘플을 보면 Doppler 확산값이 커짐에 따라 수중 음향 OFDM 시스템 성능이 저하됨을 볼 수 있다.

그리고 주파수 선택적인 영향과 시간 선택적인 영향에 따라 결과를 비교할 수 있다. 첫번째로 주파수 선택적인 영향과 시간 선택적인 영향을 모두 크게 받는 경우가 있다. (a), (d), (e,f,g)를 보면 (e)의 9, 16, 18, 19, 20, 21, 23번 샘플, (f)의 2, 6, 9, 10, 14, 16, 18, 19, 20, 21, 23번 샘플, (g)의 5, 6, 9, 16, 18, 19, 20, 21, 23번 샘플에서 해당 경향을 확인할 수 있다. 두번째로 주파수 선택적인 영향을 크게 받는 경우가 있다. (a)와 (e,f,g)를 보면 (e)의 4, 6, 22번 샘플, (f)의 3, 4, 5, 12, 22번 샘플, (g)의 22번 샘플에서 해당 경향을 확인할 수 있다. 세번째로 시간 선택적인 영향을 크게 받는 경우가 있다. (d)와 (e,f,g)를 보면 (e)의 2, 10, 14, 15번

샘플, (f)의 1, 7, 8, 15번 샘플, (g)의 8, 15번 샘플에서 해당 경향을 확인할 수 있다.

그림 10의 (e, f, g)에는 각각 서로 다른 3가지 경우 (표 1)의 수중 음향 OFDM 파라미터에 따른 BER 성능이 나타난다. (e)와 (f)를 비교하면 (e)가 반복 횟수 4, (f)가 반복 횟수 6으로 (f)의 반복 횟수가 더 높지만 (e)의 코드율이 1/3으로써 (f)의 코드율 1/2에 비해 더 높기에 근사한 채널 환경에서 더 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있다. (f)와 (g)를 비교하면 같은 코드율의 조건에서 (f)가 (g)보다 더 큰 반복 횟수를 갖기 때문에 근사한 채널 환경에서 더 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 수중 음향 채널의 변화에 따른 수중 음향 OFDM 시스템의 성능분석 연구를 수행하기 위하여 17년 7월 5일부터 6일에 걸쳐 인천 서해 천해역에서의 시간에 따른 채널의 변화를 지속적으로 관찰하였다. 그리고 이러한 채널의 변화가 수중 음향 OFDM 시스템 성능에 영향을 주는 정도를 확인하기 위하여 빠르게 변하는 채널의 변화에 따른 수중 음향 OFDM 시스템 성능을 분석하였다. 송출 신호는 tone 신호, HFM 신호, Zadoff-Chu 신호, 그리고 다수의 OFDM 심볼들로 구성하여 실험을 수행하였다.

실제 측정을 통해 수중 음향 OFDM 시스템의 성능에 영향을 미치는 요인이 주파수 선택적인 특성과 시간 선택적인 특성으로 설명할 수 있음을 확인하였다. 성능 분석 결과 본 논문의 연구를 위해 측정된 환경에서는 실측결과 Doppler 성분 대비 지연 확산 값이 OFDM 성능에 큰 영향을 보임을 확인하였으며, 특히 채널의 지연 확산값이 CP 길이를 초과할 경우 발생하는 인접 심볼간 간섭의 영향으로 인해 큰 성능 악화가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

## References

- [1] D.-Y. Cho, et al., "Study for trend on underwater communication networks," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 481-482, Jeju Island, Korea, Apr. 2014.
- [2] J. H. Kim, et al., "A Study on the trends of recent underwater communication network systems," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 1678-679, Jeju Island, Korea, Nov. 2015.

- [3] B. Li, "Multicarrier communication over underwater acoustic channels with nonuniform doppler shifts," in *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 33, no. 2, pp. 198-209, Apr. 2008.
- [4] A. Radosevic, "Adaptive OFDM modulation for underwater acoustic communications: Design considerations and experimental results," in *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 39, no. 2, pp. 357-370, Apr. 2014.
- [5] L. Wan, et al., "Adaptive modulation and coding for underwater acoustic OFDM," in *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 40, no. 2, pp. 327-336, Apr. 2015.
- [6] R. Pec, et al., "Parameter Analysis for Underwater Cellular System Synchronization," in *Proc. Symp. KICS*, pp. 36-37, Nov. 2016.
- [7] J.-H. Kim, M.-S. Kim, M.-H. Cha, T.-H. Im, and H.-L. Ko, "Analysis of synchronization detection performance according to bandwidth of HFM in the West Sea underwater channel environment," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 1649-1650, Jeju Island, Korea, Jun. 2010.
- [8] R. Pec, et al., "Synchronization method for cellular systems," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 301-302, Jun. 2016.
- [9] B. Sklar, *Digital Communications*, Prentice Hall, 2001.
- [10] H. M. Roudsari, "Channel model for wideband time-varying underwater acoustic systems," *IEEE OCEANS 2017 Conf.*, pp. 1-7, Aberdeen, Scotland, Jun. 2017.
- [11] T. M. Schmidl, "Robust Frequency and Timing Synchronization for OFDM," *IEEE Tran Commun.*, vol. 45, no. 12, pp. 1613-1621, Dec. 1997.
- [12] T. Lee, et al., "Study on Implementation of OFDM System of West Coast," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 1224-1225, Jan. 2016.
- [13] S.-H. Jin, et al., "Analysis of underwater channel characteristics at western sea of korea," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 58-59 Jan. 2017.
- [14] K.-Y. Kim, et al., "Analysis of underwater channel characteristics at Tae-an sea area," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 1179-1180, Jun 2017.
- [15] J. H. Kim, et al., "Performance analysis of pilot symbol spacing for OFDM system based on measurement data at West sea," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 52-53, Jan. 2017.
- [16] Y.-H. Cho, et al., "Performance Analysis of Underwater OFDM Systems with Different Pilot Spacings in Western Sea of Korea," *J. KICS*, vol. 42, no. 12, pp. 2248-2254, Dec. 2017.
- [17] ETSI, *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP)*, TS 36.211 version 15.0.0, Release 15, 2017.
- [18] IEEE, *IEEE Std 802.11-2007, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 2007.
- [19] Y.-S. Cho, *MIMO-OFDM wireless communications with matlab*, WILEY, 2010.

조 옹 호 (Yong-Ho Cho)



2004년 2월 : KAIST 전기 및  
전자공학과 졸업  
2006년 2월 : KAIST 전기 및  
전자공학과 석사  
2013년 8월 : KAIST 전기 및  
전자공학과 박사  
2013년 9월~2016년 2월 : 삼성

전자 DMC 연구소 책임연구원

2016년 3월~현재 : 호서대학교 해양IT융합기술연구소  
교수

<관심분야> 이동통신, 수중통신, 해양통신, 사물인터  
넷

**이 태 석 (Tae-Seok Lee)**



2013년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 졸업  
2015년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 석사  
2015년 3월~현재 : 호서대학교 정보통신공학과 박사과정

<관심분야> 수중통신, 이동통신, 사물인터넷

**고 학 림 (Hak-Lim Ko)**



1983년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 공학사  
1986년 2월 : Fairleigh Dickinson Univ. 전기 및 컴퓨터공학과 공학석사  
1995년 2월 : North Carolina state Univ. 전기 및 컴퓨터공학과 공학박사

1996년~현재 : 호서대학교 정보통신공학과 정교수

<관심분야> 스마트 안테나 시스템, 이동통신, 수중통신, 해양통신