

# 수중통신에서 클리핑 기법을 적용한 OFDM 시스템 연구

## A Study on the OFDM System with Clipping Method for Underwater Communication

한 정 우\*, 김 세 영\*, 김 기 만\*, 정 지 원\*, 김 승 주\*\*, 천 승 용\*\*\*, 손 권\*\*\*, 도 경 철\*\*\*  
 (Jeong-Woo Han\*, Se-Young Kim\*, Ki-Man Kim\*, Ji-Won Jung\*,  
 Seung-Joo Kim\*\*, Seung-Yong Chun\*\*\*, Kwon Son\*\*\*, Kyoung-Cheol Dho\*\*\*)

\*한국해양대학교 전파공학과, \*\*성균관대학교, \*\*\*국방과학연구소  
 (접수일자: 2009년 2월 26일; 수정일자: 2009년 4월 25일; 채택일자: 2009년 6월 17일)

최근 수중 음향 통신의 필요성과 음성 및 고해상도 영상 데이터와 같은 다양한 데이터 전송의 요구가 증가되고 있다. 수중 음향 통신 시스템의 성능은 수중채널의 특성에 영향을 받으며, 특히 잔향 및 다중경로 (Multi-path)로 인한 지연확산은 데이터 전송 시 인접심벌간의 간섭 (Inter Symbol Interference : ISI)을 발생시켜 통신의 성능을 저하시킨다. 본 논문에서는 수중 채널에서 지연 확산에 강한 성능을 나타내는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기법을 연구하였다. 또한 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)이 높은 경우 발생하는 성능저하를 극복하기 위해 클리핑 기법을 적용하였다. 실제 수중 채널을 모의하는 모델 및 수조에서의 실험을 이용하여 수중 음향 통신의 성능을 확인하였다. 그 결과 클리핑 기법을 이용한 다중 반송파가 가장 낮은 비트 오차율을 나타내었으며, 단일 반송파를 이용한 전송이 가장 높은 비트 오차율을 나타내었다.

**핵심용어:** 수중 음향 통신, 인접 심벌간의 간섭 (ISI), 다중 반송파, 비트 오차율 (BER)

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.6)

Recently, the necessity of underwater acoustic communication and demand for transmitting and receiving various data such as voice or high resolution image data are increasing as well. The performance of underwater acoustic communication system is influenced by underwater channel characteristic. Especially, a delay spread caused by reverberation and multi-path induces the ISI (Inter-Symbol-Interference) and reduces the communication performance. In this paper, we study the OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) technique for robust the delay spread in underwater channel. We also use the clipping method to overcome the performance degradation in high PAPR (Peak-to-Average Power Ratio). We confirm the performances of underwater communication system by the underwater channel model simulation model and experiment in small water tank. As a result, the multi-carrier modulation with clipping method presented low BER and the previous single carrier modulation had high BER.

**Keywords:** Underwater communication, Inter-Symbol-Interference, Multi-carrier, Bit error rate

**ASK subject classification:** Underwater Acoustics (5.6)

### I. 서론

수중통신은 매질 특성상 전파 대신 음파를 사용하여야 하지만 고주파 손실이 커서 대역폭이 좁고 배경 잡음의 영향을 많이 받는다. 특히 수중통신 시스템의 성능은 채널의 특성에 의해 좌우되며, 수중 채널의 경우 전달 과정에서 잔향 및 다중경로 전달 등에 의해 수신 신호가 크게

왜곡된다. 수중에서 고속 데이터 전송을 위하여 수중 통신 채널 특성을 결정하는 해수면, 해저, 수심 등의 시공간 변화에 의한 다중경로 특성이나 도플러 확산이 시스템의 설계에 고려되어야 하며 특히 천해에서의 다중경로는 해수면의 시변 산란에 의해 도플러 확산파가 직접파에 혼합되어 통신 채널의 특성을 좌우한다 [1][2]. 이러한 채널 특성의 시공간적인 변화는 디지털 수중 통신에서 신호의 인접 심벌간의 간섭 (Inter Symbol Interference : ISI)을 발생시켜 통신 시스템의 성능을 저하시킨다. 이러한 수중 통신 채널의 특성 때문에 과거에는 FSK 등과

책임저자: 김 기 만 (kimkim@nhu.ac.kr)  
 606-791 부산광역시 영도구 동삼2동 한국해양대학교 전파공학과  
 (전화: 051-410-4918; 팩스: 051-404-3986)

같은 비동기 위상 (non-coherent) 변조기법을 이용하여 수중 통신 시스템을 구현하였다 [2]. 하지만 미국 WHOI (Woods Hole Oceanographic Institution)에서 PSK (Phase Shift Keying) 기법을 이용한 수중 통신의 실험결과를 발표한 이후로 PSK나 QAM 등과 같은 동기위상 (phase-coherent) 디지털 변조 기법을 활용한 수중 통신 시스템 연구가 활발히 진행되고 있다 [3].

기존에 연구된 수중 디지털 통신 시스템을 살펴보면, 미국의 WHOI 에서는 15 kHz 대역에서 MFSK (Multiple Frequency Shift Keying) 변조 기법을 사용하여 1200 bps로 데이터 전송 실험을 수행하였다 [4]. 일본에서는 20 kHz 대역에서 4-DPSK (Differential Phase Shift Keying) 변조 기법을 사용하여 16 kbps의 전송률을 얻었으며 [7], QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 변조를 이용하여 60 m의 근거리에서 500 kbps 전송률을 실현한 시스템도 보고되었다 [5]. 국내의 경우 전송률을 향상시키기 위해 송신 하이드로폰 어레이를 사용하거나 채널 추정을 이용한 방법들이 연구되었다 [6][7]. 또한 수중 채널 모델을 이용하여 FSK 방식뿐만 아니라, PSK (Phase Shift Keying)와 같은 변조 기법에 따른 성능을 모의실험을 통해 성능을 분석하였으며 [8][9], 최근에는 OFDM과 같은 다중 반송파 기법을 적용한 연구가 활발히 진행되고 있다 [10].

이에 본 논문에서는 새로운 방법을 제시하기 보다는 수중 채널에서 다중경로로 인해 발생하는 인접 심벌간의 간섭을 피하기 위해 디지털 변조 기법 중 다중경로에 강한 성능을 나타내는 OFDM 기법의 적용성을 확인하기 위하여 수중 채널 모델을 이용하여 성능을 모의실험 하였으며, 실제 수조 실험을 통해 결과를 분석하였다. 또한 OFDM 시스템이 갖는 분제점 가운데 하나인 PAPR 문제를 해결하기 위한 방법들을 실제 적용하여 그 결과를 고찰하였다.

## II. OFDM 전송기법

OFDM 전송기법은 다중 반송파 방식이므로 주파수 선택적 페이딩 채널을 비선택적 협대역 부채널로 변환시켜 처리하게 되어 임의의 주파수 선택적 채널을 flat 페이딩 부채널의 합으로 표현가능하다. 또한 전송 심벌의 길이가 원래 심벌의 주기에 비해 병렬화 하여 모인 데이터의 수만큼 길어지게 되어 고속 전송 시 발생하는 인접 심벌간의 간섭 (ISI) 문제도 해결할 수 있다 [11][12]. 그림

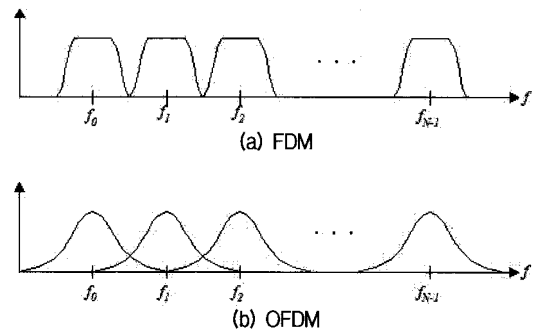


그림 1. 다중 반송파 방식의 스펙트럼 특성  
Fig. 1. Spectrum of FDM.

1은 FDM과 OFDM의 차이를 나타내고 있다. 그림 1에서 보이는 것처럼 OFDM 방식은 인접한 부채널 사이의 스펙트럼이 중첩되어 있어 FDM에 비해 대역폭 효율이 높다. 그러나 OFDM을 사용할 경우 서로 다른 각각의 부반송파 사이에 직교성이 보장되어야 한다.

### 2.1. OFDM 변·복조

그림 2는 OFDM 전송 시스템의 기본 개념을 나타낸 그림이다. 그림 2와 같이 PSK나 QAM 형태의 직렬 변조 데이터 심벌인 입력신호는 직·병렬 변환기 (Serial-to-Parallel : S/P)에 의해 병렬화 된다. 병렬화된 데이터 심벌들은 서로 직교하는 부반송파로 변조되고 이들이 모두 합해져서 하나의 OFDM 심벌을 구성하게 된다. 각각의 채널과 반송파를 부채널 (Sub-Channel)과 부반송파 (Sub-Carrier)라고 부른다. 이때 하나의 OFDM 심벌  $s(t)$  은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = Re \left\{ \sum_{k=0}^{N_s-1} X_k \cdot \exp(j2\pi(f_c + \frac{k}{T})(t-t_s)) \right\} \quad (1)$$

$$(t_s \leq t \leq t_s + T)$$

$X_k$ 는 k 번째 PSK 혹은 QAM 심벌이며,  $N_s$ 는 부반송파의 개수이며, T는 심벌 간의 간격,  $f_c$  반송파의 주파수이다.

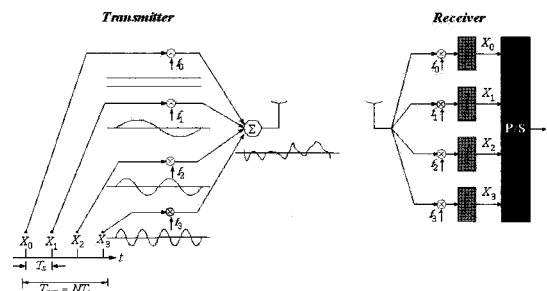


그림 2. OFDM 전송의 기본 원리  
Fig. 2. Basic idea of OFDM transmission.

식 (1)로 정의되는 하나의 OFDM 심벌 식은 N개의 입력 심벌에 대한 역 푸리에 변환 (Inverse Fourier Transform)과 수학적 표현이 동일하므로 그림 2와 같이 다수의 발진기 대신에 식 (2)와 같이 역 이산 푸리에 변환 (Inverse Discrete Fourier Transform : IDFT)이 되며, 실제 구현 시 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)로 구현하게 된다.

$$s(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot \exp(j \frac{2\pi}{N} nk) \quad (2)$$

이렇게 생성된 OFDM심벌은 채널의 다중경로에 의해 발생하는 인접 심벌간의 간섭을 방지하기 위해 보호구간을 삽입한 다음 D/A변환기 (Digital-to-Analog Converter : DAC)를 통과하여 식 (3)과 같이  $s(t)$ 로 변환된다.

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot \exp(j2\pi k \Delta f t) \quad (3)$$

신호  $s(t)$ 는 반송 주파수  $f_c$ 가 곱해져 최종 송신신호인  $s_{TX}$ 가 되어 채널로 전송되며, 송신신호는 식 (4)과 같다.

$$s_{TX} = s(t) \cdot \exp(j2\pi f_c t) \quad (4)$$

수신부에서 수신한 채널을 통과한 수신신호는 다음과 같다.

$$y(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H_k \cdot X_k \exp(j2\pi(f_{offset} + k\Delta f)t) + AWGN \quad (5)$$

이때  $f_{offset}$ 은 채널에 의해 발생한 주파수 오프셋이며, AWGN은 부가 백색 가우시안 잡음 (Additive White Gaussian Noise)이다. 신호  $y(t)$ 는 A/D변환기 (Analog-to-Digital Converter: ADC)를 거쳐 디지털 신호로 변환되며 그 식은 다음과 같다.

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H_k \cdot X_k \exp\left(j \frac{2\pi}{N} \left(\frac{f_{offset}}{\Delta f} + k\right)(n + \delta)\right) + AWGN \quad (6)$$

$\delta$ 는 ADC에 의해 발생한 샘플링 오프셋이다. ADC에 의해 디지털화된 신호  $y(n)$ 은 직·병렬 변환기를 거쳐 다시 병

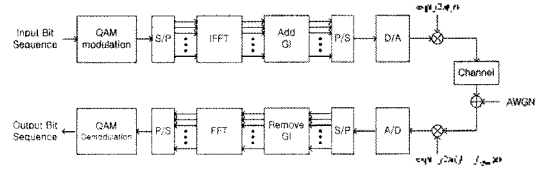


그림 3. 기본적인 OFDM 시스템의 블록다이어그램  
Fig. 3. Block diagram of basic OFDM system.

렬화되며 보호구간을 제거한 후 FFT를 사용하여 OFDM 복조를 한다. 이후, 다시 병·직렬 변환기에 의해 직렬화되며 PSK 혹은 QAM 복조가 이루어진다. 그림 3은 OFDM 통신 시스템의 송신부와 수신부의 블록다이어그램을 보여준다.

### 2.2. 보호구간

OFDM 심벌이 다중경로 채널을 통해 전송되는 동안 현재의 심벌은 이전의 심벌에 의해 영향을 받게 된다. 이러한 각각의 OFDM 심벌간의 간섭을 방지하기 위해 연속된 OFDM 심벌 사이에 보호구간 (Guard Interval : GI)을 삽입한다. 이때 보호구간의 길이는 예상되는 채널의 최대 지연확산보다 길어야 한다.

OFDM 보호구간의 삽입방식은 크게 두 가지로 구분된다. 그림 4는 보호구간에 '0'을 삽입하는 ZP (Zero Padding) 방식과 자신의 신호 중 일부를 복사하여 삽입하는 CP (Cyclic Prefix) 방식을 보여준다. 그림 4(a)는 ZP 방식으로 보호구간의 값을 '0'으로 하면 수신부에서 첫 번째 부반송파의 복조 시 지연되어 수신된 두 번째 부반송파로부터 간섭을 받지만 보호구간을 제거한 후에는 ISI는 발생하지 않는다. 하지만  $T_{delay}$ 만큼의 지연신호가 첫 번째 부반송파에 영향을 주어 인접 채널간의 간섭 (Inter Channel Interference: ICI)이 발생하게 된다. 이는 부반송파간의 직교성이 더 이상 성립하지 않음을 의미한다. 이리

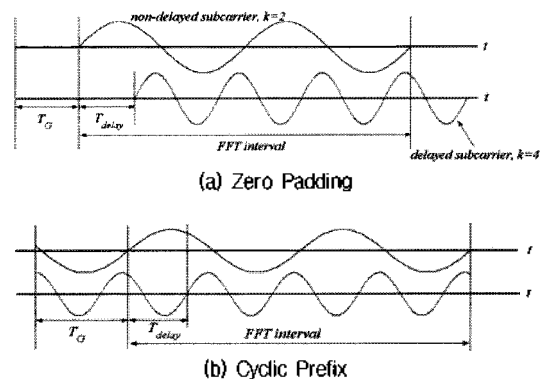


그림 4. 보호구간 삽입방법  
Fig. 4. Guard interval insertion method.

한 인접 채널간의 간섭을 피하기 위해 보호구간에 자신의 신호 중 일부를 복사하여 삽입하는 CP 방식을 그림 4(b)에 나타내었다. 첫 번째 부반송파의 복조 시 지연되어 수신된 두 번째 부반송파로부터 간섭을 받으나 보호구간을 제거한 후에도 부반송파 사이에 직교성이 유지되므로 ISI 뿐만 아니라 ICI도 발생하지 않는다.

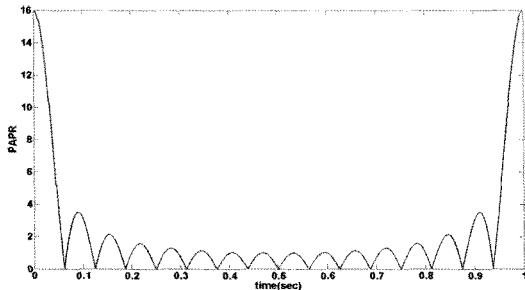


그림 5. 16채널 OFDM 신호에 대한 PAPR  
Fig. 5. PAPR of 16-subcarrier OFDM signal.

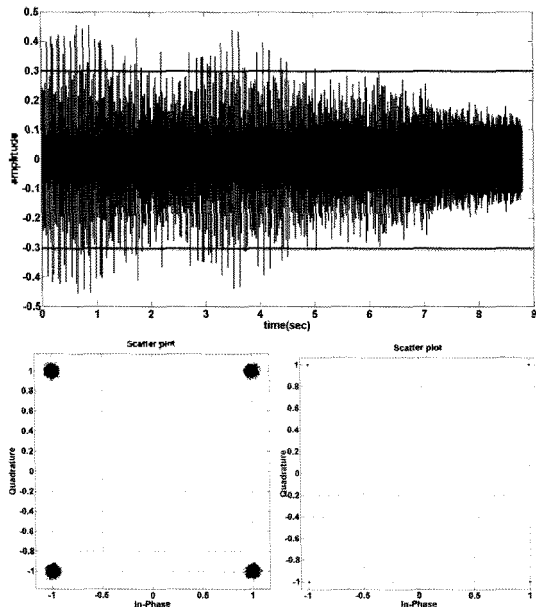


그림 6. 클리핑 기법의 성상도 비교  
Fig. 6. Compare the constellation of clipping method.

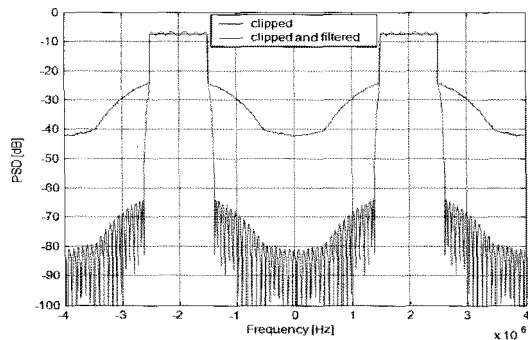


그림 7. 클리핑 기법의 스펙트럼 비교  
Fig. 7. Compare the spectrum of clipping method.

### 2.3. PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)

OFDM 신호는 독립적으로 변조된 다수의 부반송파들의 중첩으로 구성되므로 이들이 동위상으로 더해지면 신호가 크게 발생하여 PAPR이 크게 나타난다. N개의 신호가 동일한 초기 위상으로 변조되어 더해지면 최대전력 (Peak power)은 평균전력 (Average power)의 N배가 된다. 이러한 현상을 그림 5에 나타내었다. PAPR의 증가는 OFDM 시스템의 구현에 큰 장애가 될 수 있다. 특히 ADC와 DAC의 복잡도가 증가하고 이로 인해 양자화잡음이 발생하며, 전력 증폭기의 비선형 특성으로 인하여 신호대역 뿐만 아니라 인접 주파수 대역에도 간섭을 발생시키게 되고 또한 전력 증폭기의 효율을 감소시키는 요인이 된다.

PAPR을 감소시키는 간단한 방법으로 신호의 최대 크기를 특정 레벨로 제한시키는 클리핑 기법이 있다. 그러나 클리핑 기법은 OFDM 신호의 크기를 왜곡시켜 그림 6에서 보는 바와 같이 자체적인 잡음이 발생한다는 문제가 발생한다. 또한 클리핑은 비선형 왜곡에 해당하므로 신호대역 밖으로의 스펙트럼 방출이 증가한다. 하지만 클리핑으로 인한 신호대역 밖으로의 스펙트럼 방출은 그림 7과 같이 필터링을 통해 제거시킬 수 있다.

## III. 모의실험 및 결과

본 논문에서는 수중통신에서 가장 큰 장애 요인 가운데 하나인 전송 과정에서 발생하는 다중경로 등으로 인한 지연 확산 문제를 극복하기 위해 앞서 언급한 기본적인 OFDM 시스템의 성능을 모의실험 통해 고찰하였다.

### 3.1. 모의 수중 채널 환경

수중 채널 환경에서 음향 신호는 수심, 수온, 전송거리, 수면의 변화, 해저면의 상태 등과 같은 많은 변수로 인해 다양한 특성을 가진다. 특히 채널의 다중 경로로 인한 지연 확산은 수중 통신 채널에서 신호 왜곡의 주요인으로 작용한다. 해저면의 상태에 따른 채널의 지연 특성을 측정할 결과, 음파에 대한 흡수력이 뛰어난 진흙의 경우 10 ms 이내로 신호의 지연이 나타났으며, 반사와 굴절이 많이 발생하는 암반이나 모래의 경우 30 ms까지 신호의 지연이 나타나기도 한다 [13]. 이외에도 해수면의 반사, 전송거리에 따라서도 신호의 지연 시간이 다르게 나타난다. 특히 천해의 경우 음파의 속도가 수압의 영향보다는 수온에 영향을 받게 되는데 그림 8은 천해에서 깊이

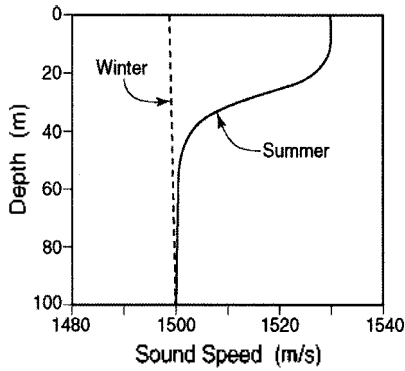


그림 8. 천해에서 음파 전달 속도 예  
Fig. 8. Acoustic Wave Speed in Shallow Water.

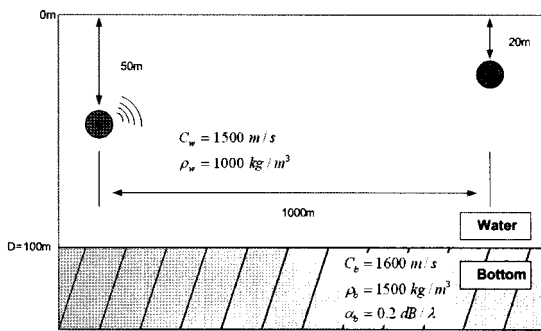


그림 9. 수중 채널 모델  
Fig. 9. Underwater channel model.

에 따른 음파 전달 속도의 한 예를 나타낸 것이다. 본 논문에서 모의실험에 사용한 수중채널 환경은 다중 경로문제를 감안하여 천해 영역으로 가정하였으며, 그 파라미터는 그림 9와 같다.  $C_w$ 는 water sound speed,  $\rho_w$ 는 water density,  $C_b$ 는 bottom sound speed,  $\rho_b$ 는 bottom density,  $\alpha_b$ 는 bottom attenuation 을 나타낸다. 모의실험을 위한 모의 수중 채널의 환경은 수심 100 m, 송신기 수심 50 m, 수신기 수심 20 m, 그리고 송신기와 수신기 사이의 거리는 1000 m로 가정하였으며, 송·수신기 사이의 음속은 등속인 1500 m/s로 설정하였다. 또한 반송파 주파수는 8 kHz로 설정하였으며, 샘플링 주파수는 32 kHz로 설정하였다. 또한, 해수면 및 해저면이 수평을 이룬다고 가정하였으며, 송·수신기의 빔폭은  $-15^\circ \sim 15^\circ$ 이다. 이러한 파라미터들을 기초로 음파 전달 모델을 이용하여 모의 수중 채널의 임펄스 응답을 계산하였으며, 이를 이용하여 수중 채널에서의 고속데이터 전송 시 OFDM의 성능을 평가하였다. 그림 10은 이러한 모의 수중채널에서의 고유음선 (Eigen Ray)를 나타낸 그림이다.

그림 10에서 보는 바와 같이 다중경로로 인해 신호의 지연이 발생되며 이때의 임펄스 응답을 그림 11에 나타내었다.

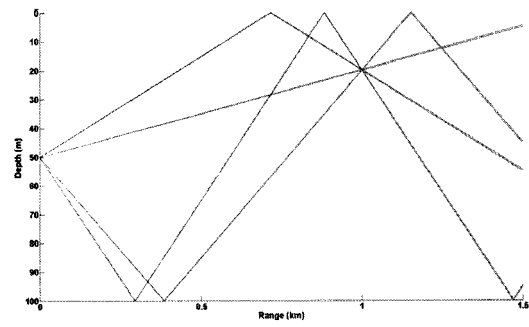


그림 10. 수중 채널 모델의 고유음선  
Fig. 10. Eigen Ray of underwater channel model.

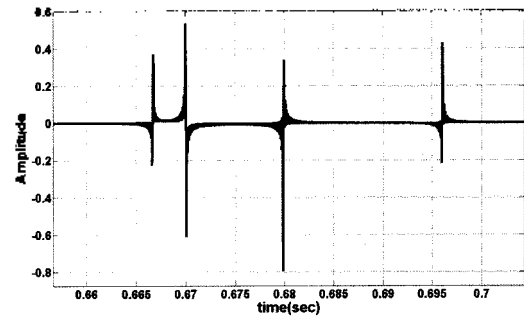


그림 11. 수중 채널 모델의 임펄스 응답  
Fig. 11. Impulse Response of underwater channel model.

### 3.2. 모의실험 결과

본 논문에서는 다중경로로 인한 심한 심벌간의 간섭을 받는 수중 채널에서의 고속데이터 전송을 위해 다중 반송파를 사용하는 OFDM 방식의 통신 시스템을 수중 채널 모델을 이용해 이미지 전송 모의실험을 수행하였다. 다중 반송파를 사용하는 OFDM의 성능을 평가하기 위해 동일한 수중채널 모델에서 단일 반송파를 사용하는 QPSK를 모의실험을 해서 각각의 성능을 비교하였다. 수중 통신에서 OFDM 전송 방식은 QPSK 변조를 사용하고, 부반송파의 개수는 512개로 하였으며, 이중 400개의 부반송파만 정보를 가지고 나머지는 가상 부반송파로 두었다. 보호구간은 부반송파의 절반으로 설정하였다. 데이터 전송속도는 5 kbps로 설정하였으며, SNR은 30 dB로 설정하였다.

그림 12는 소스 영상으로 각 픽셀 당 8비트로 양자화되어 있는  $50 \times 50$  크기를 갖는 영상이다. 그림 13은 앞서 설명된 모의 수중채널에서 단일 반송파를 사용하는 QPSK를 사용한 통신 방식의 결과이며, 그림 14는 다중 반송파를 사용하는 OFDM 방식을 사용한 통신 방식의 결과이다. 이때 채널 코딩이나 등화기 (equalizer)와 같은 기법들은 적용하지 않았으며, 시간 동기화는 완벽하다고 가정하였다.



그림 12. 원본 영상  
Fig. 12. Original image.



그림 13. QPSK 변조의 모의실험 결과  
Fig. 13. Simulation result of QPSK modulation.



그림 14. OFDM 시스템의 모의실험 결과  
Fig. 14. Simulation result of OFDM system.

모의 수중 채널을 이용한 통신 방식별 결과를 비교하였을 때 QPSK의 경우 여러 데이터는 총 20,000개의 데이터 중 4625개로 BER이 약  $2 \times 10^{-1}$  이었으며, OFDM을 이용했을 경우 총 20,000개의 데이터 중 1778개로 약  $8 \times 10^{-2}$  이었다. 또한 클리핑 기법을 사용한 OFDM 시스템의 경우 높은 SNR로 인하여 클리핑 기법을 사용하지 않았을 경우와 거의 유사한 결과를 나타내었다. 그림 11과 그림 12의 결과를 비교해 볼 때 다중반송파를 이용한 OFDM 전송방식이 단순한 기존의 단일 반송파를 이용한 QPSK 전송방식에 비해 향상된 성능을 보인다. 이는 주파수 선택적 페이딩 채널을 비선택적 협대역 부채널로 변환시켜 처리하여 인의의 주파수 선택적 채널을 flat 페이딩 부채널의 합으로 표현하는 OFDM의 특징으로 인해 고속 전송 시 발생하는 인접 심벌간의 간섭 문제를 해결하므로 단일반송파 방식인 QPSK에 비해 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

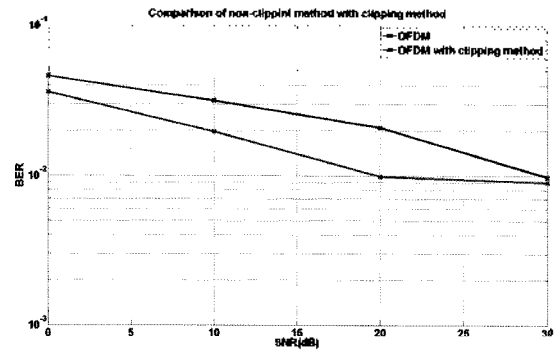


그림 15. SNR에 따른 BER 비교  
Fig. 15. Comparison of non-clipping method with clipping method.

또한 클리핑 기법을 사용한 OFDM과 일반적인 OFDM의 성능을 비교하기 위해 동일한 모의 수중채널을 가지고 모의실험을 수행하였다. SNR이 높은 경우에는 잡음에 의한 신호의 감쇄가 낮아 서로 유사한 결과를 보였으므로, SNR을 5 dB로 낮추어 다시 모의실험을 수행한 결과 클리핑 기법을 사용한 OFDM의 경우 총 20,000개의 데이터 중 1878개로 약  $9 \times 10^{-2}$  이었으며, 클리핑 기법을 사용하지 않은 OFDM의 경우에는 3158개로 약  $1 \times 10^{-1}$  이었다. 이는 높은 PAPR과 낮은 SNR로 인해 상대적으로 낮은 레벨의 신호가 잡음에 의해 감쇄되어 복조가 이루어지지 못했으나, 클리핑기법의 사용으로 인해서 신호의 레벨이 올라가 잡음으로 인한 감쇄를 극복함으로써 향상된 신호의 복조가 이루어졌음을 알 수 있다. 그림 15는 일반적인 OFDM기법과 클리핑기법을 사용한 OFDM을 다양한 SNR에 따른 BER의 값을 나타낸 그림이다. 결과를 보면 20 dB 이후부터는 일반적인 OFDM과 클리핑 기법을 사용한 OFDM의 결과 값이 서로 유사한 결과를 보이는데 이는 20 dB이후부터는 잡음의 영향보다 채널의 특성으로 인한 오류의 발생이 크다는 것을 알 수 있다.

#### IV. 구조실험 및 결과

수중에서 OFDM 시스템의 실제 적용성 및 성능을 검증하기 위하여 구조를 이용하여 2008년 11월에 실험을 수행하였다. 모의실험에 비해 실제 구조실험의 경우 공간적인 한계 및 실험장비의 한계, 송·수신시 데이터의 크기 및 복조 시 데이터 계산량의 문제점으로 인해 구조 실험에 사용한 데이터는 모의실험 소스 데이터의 1/4크기인 25×25크기의 흑백 영상 파일로 하였다. OFDM 전송 방식은 QPSK 변조를 사용하고, 부반송파의 개수는 128개로

하였으며, 이중 100개의 부반송파만 정보를 가지고 나머지는 가상 부반송파로 두었다. 또한 공간의 한계로 인해 발생하는 신호의 지연시간을 고려해서 보호구간을 부반송파의 절반으로 설정하였으며, 반송 주파수는 실험에 사용된 센서의 제원에 따라 12 kHz로 하였으며, 샘플링 주파수는 192 kHz이다. 데이터 전송속도는 100 bps, SNR은 20 dB로 설정하였다. 그림 16은 실제 실험에 사용된 수조의 제원이며, 표 1은 실험에 사용된 세부 파라미터이다. 그림 17은 실험의 블록 다이어그램이며, 그림 18은 실험 시 구축한 장비의 사진이다.

수조의 잔향음 및 다중경로의 특성을 파악하기위해 아주 짧은 short pulse인 burst 신호를 송신한 뒤 수신한 신호를 이용하여 수조의 채널특성을 분석하였다. 그림 19

는 burst 신호를 가지고 송·수신한 결과로써 초기 반향이 포함되어 있는 것을 볼 수 있다.

실험 과정은 Binary bit로 변환된 이미지 파일을 QPSK 심벌로 변환한 후 IFFT를 수행하여 각각의 부반송파로 변조시켰다. 이후 Cyclic Prefix 기법을 이용하여 보호구간을 삽입한 후 OFDM 심벌을 만들었다. 이렇게 생성된 OFDM 심벌을 반송파 주파수인 12 kHz로 Up conversion 하여 D/A 컨버터를 이용하여 센서를 통해 송신하였다. 수신부에서는 센서를 통해 수신된 데이터를 아날로그 필터와 A/D 컨버터를 거쳐 디지털 데이터로 변환한 후 기저 대역으로 Down conversion 하였다. 다음으로 보호구간인 CP를 제거한 다음 FFT를 수행한 후 QPSK 복조를 하여 신호를 복원하였다. 수신 신호를 복조하기 위해 신호의 검출 및 시간 동기는 송신하는 신호의 앞부분에 훈련 심벌을 삽입하여 검출 및 동기를 맞추었으며, 이때 사용된 훈련 심벌은 IEEE 802.11a의 WLAN (Wireless LAN)에 사용되는 훈련 심벌을 사용하였다. 훈련 심벌은 짧은 훈련 심벌 (Short training symbol)과 긴 훈련 심벌 (Long training symbol)로 구성되며, 짧은 훈련 심벌의 경우 동일한 신호가 반복되는 특징을 가지므로 이러한 특징을 이용하여 짧은 훈련심벌의 자기상관을 이용하여 신호의 검출 및 시간 동기를 맞추었다. 그림 20은 단일반송파를 이

표 1. 수조 실험 파라미터

Table 1. Parameter for water tank experiment.

변조방식	QPSK	OFDM (QPSK)
전송속도	100 bps	100 bps
센서	송신부	ITC - 3013
	수신부	B&K - 8103
전송데이터	25 * 25 gray scale image (5,000 bit)	
Carrier / Sampling	12 kHz / 192 kHz	
Sub Carrier	Single Carrier	active : 100, null : 28 Total : 128
CP length	-	64

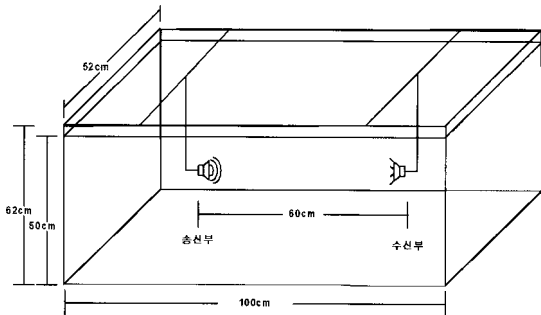


그림 16. 수조 실험 환경

Fig. 16. Environment of experiment.

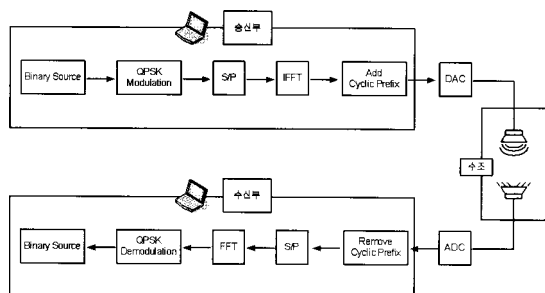


그림 17. 수조 실험 블록 다이어그램

Fig. 17. Block diagram of experiment in water tank.



그림 18. 수조 실험 장비

Fig. 18. Block diagram of experimental setup.

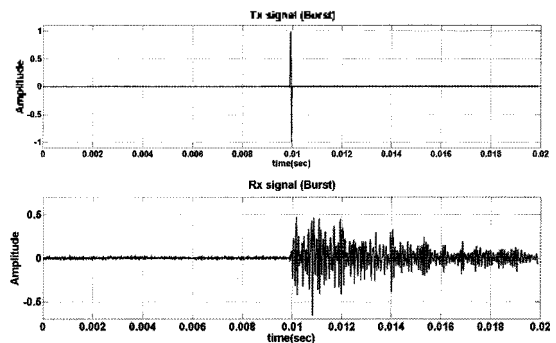


그림 19. 수조의 채널 특성

Fig. 19. Channel characteristics of small water tank.

용한 QPSK 변조를 이용한 경우로써 에러 데이터의 개수가 총 5,000개의 데이터 중 2,064개로 BER이 약  $4 \times 10^{-1}$  이었으며, 그림 22는 다중 반송파를 이용한 OFDM의 경우로, 총 5,000개의 데이터 중 1,032개의 비트 오차를 나타내 BER이 약  $2 \times 10^{-1}$  이었다. 그림 23은 클리핑 기법

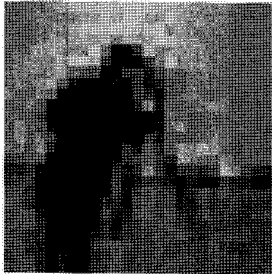


그림 20. 원본 영상  
Fig. 20. Original image.

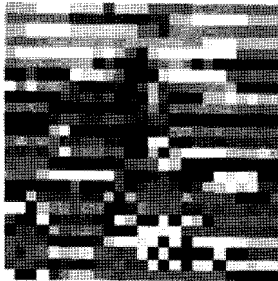


그림 21. QPSK 변조의 수조 실험 결과  
Fig. 21. Experiment result of QPSK modulation in water tank.

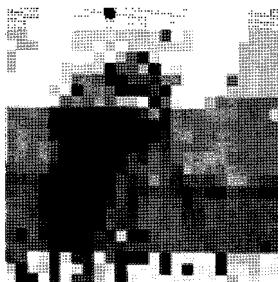


그림 22. OFDM 시스템의 수조 실험 결과  
Fig. 22. Experiment result of OFDM system in water tank.

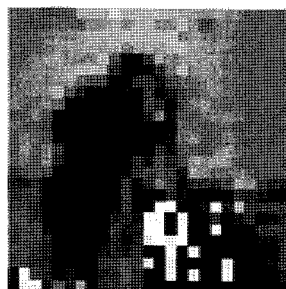


그림 23. 클리핑 기법을 사용한 OFDM 시스템의 수조 실험 결과  
Fig. 23. Experimental result of OFDM system with clipping method in water tank.

을 적용한 OFDM의 경우이며, 총 5,000개의 데이터 중 415개로 BER이 약  $8 \times 10^{-2}$  이다. 결과적으로 다중 반송파를 사용한 OFDM의 경우 단일 반송파를 사용한 QPSK에 비해 통신 성능이 향상되어 에러 데이터가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 OFDM의 특징으로 인해 고속 전송 시 발생하는 인접 심벌간의 간섭 문제를 해결하므로 단일반송파 방식인 QPSK에 비해 향상된 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 클리핑 기법을 사용한 OFDM의 경우 클리핑 기법을 사용하지 않은 OFDM에 비해 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 클리핑 기법을 사용함으로써 신호의 레벨이 올라감으로 인해 잡음으로 인한 감쇄를 극복함으로써 향상된 신호의 복조가 이루어졌음을 알 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 수중 채널에서 고속 데이터 전송을 위해 OFDM 방식의 통신 시스템을 설계하였다. 모의 수중 통신 시뮬레이션 결과 OFDM 통신 방식이 다중경로에 강하다는 것을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 수조 실험을 통해서도 실제 성능을 확인할 수 있었다.

클리핑 기법을 사용하여 PAPR 저감 기법을 사용한 OFDM의 경우 클리핑 기법으로 인해 잡음이 발생하지만 그보다 PAPR 저감으로 인한 효과가 더욱 효과적 이어서 실제 통신에서는 일반적인 OFDM에 비해 향상된 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

향후 연구 내용으로는 정확한 채널 임펄스 응답을 추정하기 위한 기법의 연구 및 주파수 오프셋 및 심벌 오프셋 보상 기법의 연구가 이루어져야 하며, 전송속도의 증가에 따른 성능 분석이 필요하다. 아울러 수조 환경의 수중 통신 채널이 아닌 실제 해양에서의 실험이 이루어져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다 (계약번호 UD070054AD).

## 참고 문헌

1. A. Baggeroer, "Acoustic telemetry - an overview," *IEEE J.*



*Oceanic Eng.*, vol.9, no.4, pp.229-235, 1984.

2. Daniel B. Killoyle and Arthur B. Baggeroer, "The state of art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol.25, no.1, pp.4-27, 2000.
3. L. Freitag, M. Stojanovic, M. Grund, S. Singh, "Acoustic Communications for Regional Undersea Observatories," in *Proc. Oceanology International 2002*, Mar, 2002.
4. M. Suzuki and T. Sasaki, "Digital acoustic image transmission system for deep sea research submersible," *IEEE Oceanic Eng. Cont.*, pp.567-570, Oct. 1992.
5. A. Kaya and S. Yauchi, "An acoustic communication system for subsea robot," *IEEE Oceanic Eng. Cont.*, vol. 3, pp. 765-770, 1989.
6. 이외형, 손윤준, 김지만, "하이브리드 송신 어레이를 이용한 수중 음향 통신 시스템의 성능 향상," *한국음향학회지*, 21권, 7호, 606-613쪽, 2002.
7. Oe-Hyung Lee, Yoon-Jun Son, and Ki-Man Kim, "Underwater acoustic communications using channel estimation," *IEEE Oceanic Eng. Cont.*, vol. 4, pp. 2453-2456, Oct. 2002.
8. 윤종락, 백승관, 박지현, 임춘단, "FSK 방식의 수중 데이터 전송 특성 해석," *제4회 해상무기체계 발전 세미나 논문집*, 299-303쪽, 2002.
9. 손근영, 노용주, 윤종락, "수중 데이터 통신 시스템 개발 - 변조 방식의 성능 분석," *한국음향학회 학술발표대회 논문집*, 19권, 2(s)호, 281-284쪽, 2000.
10. 김병철, I-Tai Lu, "OFDM 수중음향통신 신호처리 설계와 성능평가," *한국음향학회 학술발표대회 논문집*, 23권, 2(s)호, 487-490쪽, 2004.
11. Nee, R.V. and Prasad, R, *OFDM for wireless multi-media communications*, Artech House, Boston, 2000.
12. Bahai, Ahmad, R.S, Saltzberg, Burton R, and Ergen, Mustafa, *Multi-carrier digital communications : theory and applications of OFDM*, Springer, New York, 2004.
13. S.Coatelan and A.Glavieux, "Design and test of a coding OFDM system on the shallow water acoustic channel," *OCEANS-'95, MTS/IEEE Challenges of Our Changing Global Environment Conference Proceedings*, vol. 3, pp. 2065-2070, Oct 1995.

## 저자 약력

### •한 정 우 (Jeong-Woo Han)



2007년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)  
 2009년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 석사  
 2009년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 박사 과정  
 ※관심분야: 수중통신, DSP, 마이크로프로세서 하드웨어 구현

### •김 세 영 (Se-Young Kim)



2005년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)  
 2007년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 석사  
 2007년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 박사 과정  
 ※관심분야: 소나 신호처리, 어레이 신호처리

### •김 기 만 (Ki-Man Kim)



1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
 1990년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1995년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)  
 1995년 3월~1996년 8월: 연세대학교 의과대학 의공학교실 (Fellow)  
 1996년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 교수  
 ※관심분야: 수중통신, 소나 신호처리, 3차원 음향제어, 채널 추정, DSP 및 CPLD 구현

### •정 지 원 (Ji-Won Jung)



1988년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학사)  
 1991년 2월: 성균관대학교 통신공학과 (공학석사)  
 1995년 2월: 성균관대학교 통신공학과 (공학박사)  
 1996년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 교수  
 ※관심분야: 위성통신, 채널부호화및모뎀, FPGA설계

### •김 승 주 (Seung-Joo Kim)



1994년 2월: 성균관대학교 통신공학과 (공학사)  
 1996년 2월: 성균관대학교 통신공학과 (공학석사)  
 1999년 2월: 성균관대학교 통신공학과 (공학박사)  
 1998년 12월~2004년 2월: KISA(Korea Information Security Agency) 위원  
 2004년 3월~현재: 성균관대학교 정보통신 공학과 교수  
 ※관심분야: 암호학, 정보이론, 암호기 복구기술, 소프트웨어 역분석 방지 기술

### •천 승 용 (Seung-Yong Chun)

한국음향학회지 제16권 제6호 참조

### •손 권 (Kwon Son)

한국음향학회지 제18권 제8호 참조

### •도 경 철 (Kyoung-Cheol Dho)

한국음향학회지 제19권 제8호 참조