

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2017.3.4.191  
JCCT 2017-11-26

## 수중 음향 다중 경로 채널에서 수중 음향 통신 시스템 성능 분석

### Performance Analysis of UWA Communication System by Diversity in UWA Channel

이호준\*, 강지웅, 안종민, 정재학\*\*

Hojun Lee\*, Jiwoong Kang, Jongmin Ahn, Jaehak Chung\*\*

**요약** 본 논문은 수중의 시간적으로 긴 다중 경로 채널 환경에서 Code Division Multiple Access(CDMA)와 Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM)의 전송성능을 비교 분석한다. 이를 위해 서해 정점의 수중 환경 자료를 기반으로 Bellhop을 /통해 수중 다중 경로 채널을 생성한다. 이를 기반으로 한 다양한 수중 채널을 통해 수중 음향 통신방식으로 사용되는 CDMA와 OFDM의 BER 성능을 비교 분석하였다. 실험 결과 CDMA의 경우 수중 채널의 다중 경로 시간이 Spreading Factor(SF)에 의한 시간보다 짧은 경우 OFDM보다 성능이 우수하였지만 채널의 시간 지연이 길어짐에 따라 OFDM이 CDMA 보다 BER 성능이 우수함을 보였다.

**주요어** : 유와 커뮤니케이션, CDMA, OFDM

**Abstract** In this paper, we compare the transmission performance of Code Division Multiple Access (CDMA) and Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) under long duration multipath channel environments. This paper generates underwater channels through Bellhop based on the underwater environmental data of the west sea. BER performance of CDMA and OFDM are analyzed through various underwater channels based on the channels. Computer simulations result show that CDMA has better performance than OFDM when multipath delay time of underwater channel is shorter than spreading factor (SF). However, OFDM has better BER performance than CDMA as multi-path delay time increases.

**Key Words** : UWA communication, CDMA, OFDM

#### 1. 서 론

수중 음향 통신은 지상의 radio frequency (RF) 통신과는 달리 전파를 통한 통신이 불가능하기 때문에 주로 음파를 사용한다[1]. 수중에서는 해수면과 해저지형에 의해서 반사파가 발생되며 음파의 속도가 빛의

속도 보다 느리므로 다중 경로 채널로 인한 inter symbol interference (ISI)의 문제가 RF 통신에 비해 크다.

이와 같은 문제를 극복하기 위한 방법으로 신호의 대역 확산(spread spectrum) 방식을 이용한 Code Division Multiple Access(CDMA) 전송방식과 Orthogonal

\*준회원, 인하대학교 전자공학과

\*\*정회원, 인하대학교 전자공학과

접수일: 2017년 9월 6일, 수정완료일: 2017년 9월 13일

게재확정일: 2017년 10월 23일

Received: 6 September, 2017 / Revised: 13 September, 2017

Accepted: 23 October, 2017

\*\*Corresponding Author: jchung@inha.ac.kr

Dept. of Electronic Engineering, Inha University

Frequency Division Multiplexing (OFDM) 전송방식을 이용한다[2]. CDMA 전송방식은 긴 확산 부호의 직교성을 이용해서 다중 경로에 의한 ISI 문제를 줄일 수 있으며 낮은 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)로 인해 OFDM보다 장거리 전송에 유리하다. OFDM 전송방식은 CP(Cyclic Prefix) 삽입을 통해 ISI 효과를 제거할 수 있으며 1-tap의 간단한 등화기의 사용이 가능해 수신기의 복잡도를 줄일 수 있는 장점도 있다. 수중에서는 지상에서와 달리 음파를 사용하므로 할당할 수 있는 대역폭이 좁다. 따라서 CDMA의 Spreading Factor (SF)를 크게 할 수 없다. 짧은 SF로 인해 이보다 긴 다중 경로에 대한 Rake 수신기를 사용할 수 없는 문제가 있다. OFDM 전송방식은 OFDM 심볼의 PAPR 문제로 인해 단일 반송파 방식에 비해 동일한 출력의 송신 앰프를 사용하여도 back-off로 인해 전송 출력이 줄어들어 장거리 전송에 부적합하다는 문제가 있다[3].

본 논문에서는 다양한 다중 경로를 갖는 수중 채널에서의 CDMA와 OFDM의 채널환경에 따라 달라지는 성능을 분석하기 위해 BER을 비교한 후 두 전송기법의 장단점을 분석한다. 이를 위해 수중 채널을 경로의 개수, 지연 확산 및 경로 이득을 변화시키면서 전송 성능 분석을 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 수중 채널의 특성에 대해 설명하고 3장에서 CDMA와 OFDM을 설명한다. 4장에서 전산 모의실험을 통해서 각 채널별 성능을 비교 및 분석한 후 각 채널별 우수한 통신 시스템을 선택한다. 그리고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 수중 음향 채널의 특성

수중 통신에 영향을 주는 요인으로는 수중에서 발생하는 경로 손실과 다중 경로 채널에 의한 ISI가 있다. 다중 경로 채널은 수중의 해수면과 해저지형에 의해 반사파가 발생되기 때문에 나타나는 현상으로 음파의 속도가 빛의 속도에 비해 느리므로 다중 경로의 길이가 지상보다 긴 특징이 있다. 본장에서는 이 두 가지 수중 환경에 대한 것을 알아보고 이를 이용하여 수중 통신 기법 성능 분석에 사용한다.

### 1. 경로 손실

수중에서 음파의 속도는 수온, 염도, 압력 등의 영향에 따라 결정되는데 일반적으로 대기 중 보다 약 4.4배 정도 빠른 약 1500m/s 정도의 값을 가진다[4]. 이 음파는 매질인 물을 통해 전파되는 동안 다양한 요인으로 인해 음파가 흡수되어 신호의 세기가 감소한다. 전송 손실(Transmission Loss) 혹은 경로 손실(Path Loss)은 기준 거리에서 단위 면적당 음파 세기의 손실로 정의되고 본 논문에서 이용하는 경로 손실 모델은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$TL = 10 \log \frac{A(l, f)}{A_0} \quad (1)$$

$$= k * 10 \log l + l * 10 \log a(f)$$

여기서  $l$ 은 거리,  $A_0$ 는 단위 정규화 상수,  $f$ 는 kHz 단위의 주파수를 나타내고,  $k$ 는 확산인자이다.  $10 \log a(f)$ 는 음파의 흡수율(Absorption Coefficient)을 의미한다. 흡수율은 단위 km당 감쇄 dB값을 표현한 Thorp's formula를 통해 경험적으로 나타낼 수 있고 그 값은 다음과 같다[6].

$$10 \log a(f) = \frac{0.11 * f^2}{1 + f^2} + \frac{44 * f^2}{4100 + f^2} + 2.75 * 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (2)$$

이를 통해 경로손실이 주파수와 거리에 비례함을 알 수 있다.

### 2. 다중 경로

수중에서의 다중 경로 전파는 음파의 해수면, 해저지형 그리고 수중의 물체에 의한 반사와 굴절에 의해 형성되며 서로 다른 경로 손실과 위상을 갖는다. 본 논문에서 이용하는 이산 수중 채널 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$h(t) = \sum_p h_p \delta(t - \tau_p) \quad (3)$$

여기서  $h_p$ 는 경로 이득  $\tau_p$ 는 지연 시간을 나타낸다. 다중 경로 신호는 ISI를 발생시키고 BER 성능을 저하시킨다.

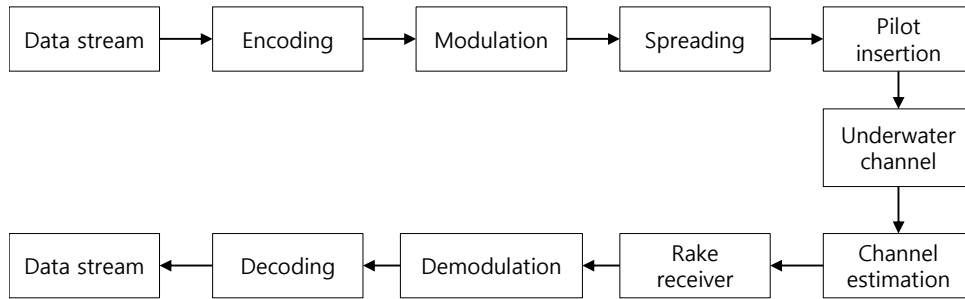


그림 1. CDMA 시스템 블록도  
 Figure 1. Block diagram of CDMA system

### III. 수중 음향 통신 방식

앞 장에서 설명한 수중 채널의 특성에서 통신하기 위한 방법으로는 대표적으로 단일 반송파 방식(single carrier: SC), CDMA와 OFDM 전송방식이 있다. 본 장에서는 SC는 잘 알려진 방식이라 생략하고 CDMA와 OFDM 두 가지 방법에 대한 장단점을 설명한다.

#### 1. CDMA의 장단점

CDMA 전송방식의 블록도를 그림 1에 나타내었다. CDMA 전송방식은 확산 부호의 직교성을 이용해서 다중 경로로 인해 발생하는 ISI를 줄일 수 있으며 OFDM보다 낮은 PAPR의 이점으로 같은 송신 전력으로 전송하는 경우 OFDM 송신기에 비해 장거리 전송이 가능하다. CDMA 방식으로 전송된 신호는 수신기에 있는 Rake 수신기를 이용하여 각각의 다중 경로를 통하여 들어온 신호를 개별적으로 처리한다. Rake 수신기의 각 핑거에서는 다중 경로로부터 발생하는 지연시간을 보상한 후 확산부호를 이용하여 역확산을 함으로써 다중 경로 성분으로부터 ISI를 줄일 수 있다. 그리고 다중 경로 성분들은 서로 독립적인 경로를 통해 송신된 신호이기 때문에 각각의 핑거를 이용하여 합쳐진 수신 신호는 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

그러나 수중 채널에서 음향 통신을 하는 경우에는 지상에 비해 좁은 대역폭으로 인해 SF를 크게 할 수 없다. 만일 수중에서 다중 채널 성분의 지연시간이 확산 시간 보다 길면 Rake 수신기에서 핑거를 잡을 수가 없어서 시간 다이버시티는 얻기 어렵고 CDMA 직교 코드간의 직교성으로 인하여 ISI 감소 효과를 얻을 수 있다.

#### 2. OFDM의 장단점

OFDM 전송방식의 블록도를 그림 2에 나타내었다. OFDM 전송방식은 IFFT/FFT를 통해 전송하고자 하는 데이터를 여러 개의 부반송파에 나누어 주파수상에서 병렬로 전송함으로써 최종 전송 심볼 길이를 길게 하여 다중 경로에 강인한 전송을 할 수 있는 방법이다. CP를 수중 채널의 다중 경로 지연시간보다 길게 하여 OFDM 심볼 앞에 삽입하면 다중 경로로부터 발생하는 효과를 줄일 수 있으므로 시간 도메인에서 발생하는 ISI를 제거할 수 있다.

OFDM 수신기에서는 등화기를 1-tap으로 간단하게 구현하여 시스템의 복잡도를 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 다수 반송파 전송방식으로 인해 전송 심볼의 크기 분포는 가우시안 형태를 가지므로 PAPR이 단일 반송파 전송 방식보다 커진다. 그러므로 송신기는 출력 신호의 왜곡을 방지하기 위해 back-off를 하여 전송하기 때문에 CDMA 전송방식과 같은 단일 반송파 신호에 비해 장거리 전송에 불리하다. PAPR을 줄이는 연구가 진행되었지만 복잡도로 인해 실제 시스템에서는 간단하게 OFDM신호를 클리핑하여 PAPR을 증하는 방법을 사용한다.

시간 영역에서의 다중 경로 전파는 주파수 영역에서 주파수 선택적 페이딩을 일으키고 상관대역(coherence bandwidth:  $B_c$ ) 밖의 신호는 서로 다른 채널을 격은 신호로 간주된다. 이 효과를 이용하여 OFDM 부반송파에서  $B_c$  보다 넓은 주파수대역에 같은 신호를 전송해주고 수신기에서 이를 합쳐줌으로써 주파수 선택적 다이버시티 이득을 얻는다. 그러나 신호를 반복하여 전송함으로써 데이터 전송률이 신호 반복 횟수만큼 낮아지게 되므로 주파수 선택적 페이딩 수만큼 신호를 반복하여 보내는 것이 어렵다.

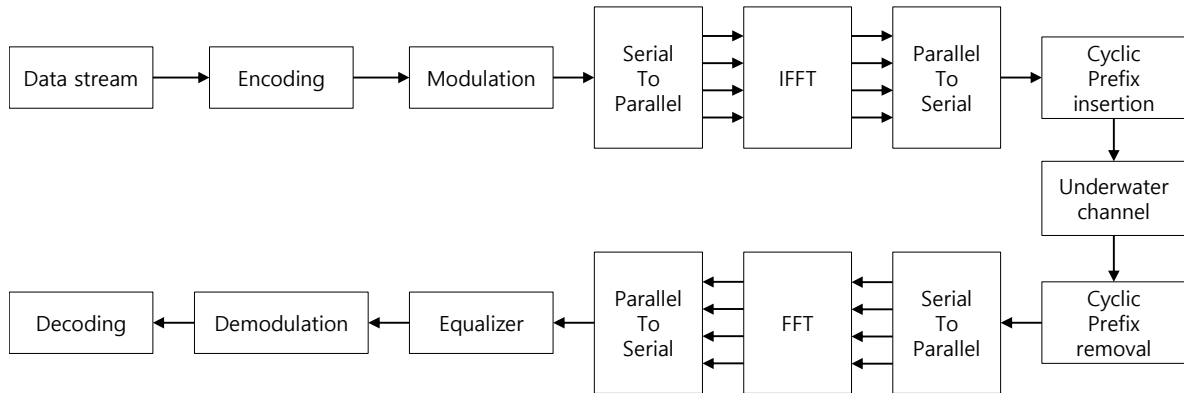


그림 2. OFDM 시스템 블록도  
Figure 2. Block diagram of OFDM system

### 3. 수중 음향 통신에서의 전송방식 선택

CDMA와 OFDM은 채널 환경에 따라서 성능의 차이가 발생한다. CDMA 방식의 장점은 SF를 이용하여 ISI를 제거할 수 있으며 다중 경로 채널에서 수신단의 Rake 수신기를 이용하여 수신 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 그러나 수중 음향 통신에서는 좁은 대역폭으로 인해 SF를 크게 할 수 없고 다중 경로에 의한 ISI에 대해서는 코드의 직교성에 의해 ISI가 제거되지만 실제적으로는 ISI가 남아 있어서 수신 성능이 저하된다. OFDM 전송방식은 CP를 이용하여 다중 경로 효과를 줄일 수 있으며  $B_c$  외의 주파수 대역에 신호를 반복 전송하여 주파수 선택적 다이버시티를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 OFDM의 높은 PAPR 문제로 인해 CDMA 방식에 비해서 SNR 손실을 가지게 된다.

그러므로 다중 경로 지연 시간이 SF의 길이보다 짧아 ISI가 대체로 제거될 수 있는 경우에는 CDMA의 BER 성능이 back-off로 인해 수신단에서 수신 전력이 떨어지는 OFDM에 비해 우수할 것이다. 그러나 CDMA에서 SF를 크게 하지 못하여 Rake 수신기에서 강한 다중 경로를 보상하지 못하게 되면 잔류 ISI로 인한 간섭 효과로 CDMA의 성능이 OFDM에 비해 저하될 것이다. 그러므로 CDMA와 OFDM의 수중 채널에 따른 BER 성능 분석이 필요하며 그 결과로부터 적절한 전송 방식을 선택해야한다.

## IV. 전산 모의실험

본 장에서는 단일 반송파 전송방식과 CDMA 그리고 OFDM 시스템을 수중 채널 환경 변화에 따른 성능 비교를 하기 위해 서해의 한 정점에 대한 수중 환경을 기반으로 Bellhop을 이용하여 채널을 모델링하고 이에 따르는 통신 변수들을 설계하였다. 그리고 수중 채널의 지연시간과 경로이득을 변화시켜 가며 BER 성능을 비교 분석함으로써 주어진 채널환경에 적합한 전송 방식에 대한 분석을 하였다.

### 1. CDMA와 OFDM 음향 통신 시스템 설계

실제 수중 채널 환경에 적합한 통신 시스템을 설계하기 위해 한국 태안 앞바다에 위치한 서해정점의 수온 음속정보를 이용한다. 거리 5km에서 Bellhop 음선 기반 채널 모델링 기법을 이용하여 수중 채널 응답 특성을 구하였고 이에 따라 SC, CDMA와 OFDM의 전송을 위한 통신 변수들을 설계 하였다.

그림 3은 수중 채널을 생성하기 위해 얻은 정점의 위치이며 이때 수중 채널 모델의 delay profile은 그림 4~6와 같다. 그림 4에 해당하는 채널은 단일 경로만 존재하고 그림 5에 해당하는 채널은 약 5ms에서 첫 번째 경로에 비해 37%의 2-way 다중 경로가 존재한다. 그리고 그림 6은 3-way 다중 경로가 존재하며 각각 첫 번째 경로에 비해 72%, 35% 크기를 갖는다. 그림 4~6에서 보는 바와 같이 수중 채널은 동일 위치임에도 불구하고 조류의 흐름이나 수온 등의 변화로 채널이 다양하게 나타난다. 따라서 본 논문에서는 다양한 채널 환경에 대한 분석을 위해 그림 4~6을 기반으



그림 3. 서해 수중 채널 모델 위치  
 Figure 3. Reference location for UWA channel modeling in Yellow sea

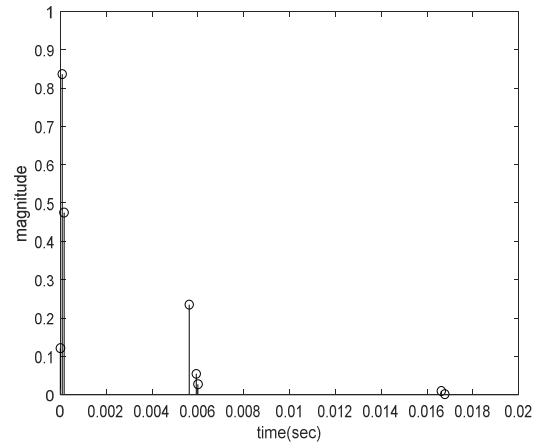


그림 5. 서해 수중 채널 2-way delay profile  
 Figure 5. UWA Channel 2-way delay profile in Yellow Sea

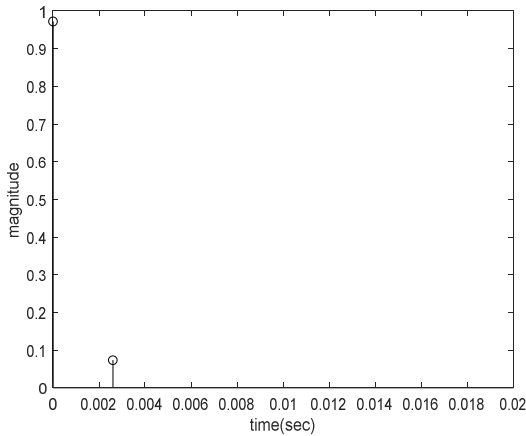


그림 4. 서해 수중 채널 단일 경로 delay profile  
 Figure 4. UWA Channel single-path delay profile in Yellow Sea

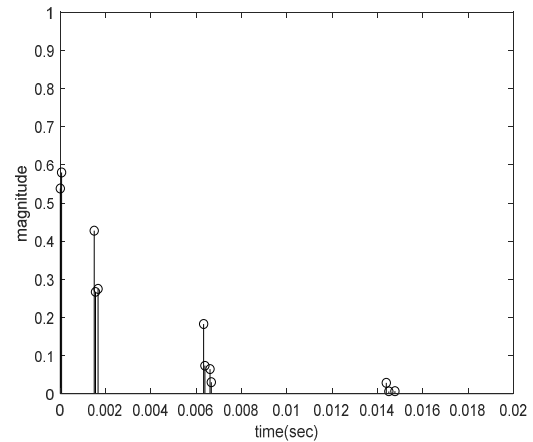


그림 6. 서해 수중 채널 3-way delay profile  
 Figure 6. UWA Channel 3-way delay profile in Yellow Sea

로 하는 채널을 임의로 생성하여 CDMA와 OFDM의 성능을 분석하는 전산 모의실험을 수행한다.

수중 통신 시 발생하는 조류의 흐름을 반영하기 위해 최대 도플러 확산은 4Hz로 가정하였다. 그리고 수중 통신시스템의 대역폭은 4kHz로 설정하였으며 거리에 따르는 경로손실은 식 (1)을 사용하였다. 전송방식별 성능을 비교하기 위하여 전송률을 416.7bps으로 동일하게 설정하였고 그 외에 사용된 공통된 통신 방식은 표 1에 나타내었다.

CDMA 전송방식의 경우 그림 6에 주어진 채널 환경과 도플러 확산을 반영하여 설계하였고 SF를 전송률을

고려하여 8로 설정 하였다. Rake 수신기는 최대 채

널 응답 크기의 70% 이상이 되는 신호만을 사용하였다.

OFDM 전송방식에서 그림 6에 주어진 실효 지연확산 (root mean square(rms) delay spread)에 따른 상관 대역폭을 고려하여 설계하였으며 주파수 영역에서 4번의 반복 전송 기법을 이용한다. PAPR을 4, 6, 8dB로 클리핑 한 후 각각에 대하여 성능을 분석하였다.

표 1. 송신 파라미터

Table 1. Transmission parameter

Tx level	174dB re 1uPa
Carrier Freq.	12kHz
Bandwidth	4kHz
Modulation	QPSK
Range	5km
Convolutional code rate	1/2
Data rate	416.7bps

2. 다중 경로 전송 성능 비교

다양한 수중 채널 환경에서의 성능을 분석하기 위해 그림 4~6에 나타난 수중 채널과 유사한 채널을 생성하였으며 분석에 사용된 수중 채널 모델은 단일 경로 그리고 2-way와 3-way의 다중 경로이다. 다중 경로 채널의 길이와 크기에 변화를 주어가며 성능 변화를 분석하였다. 그리고 CDMA의 성능을 분석하기 위해 단일 반송파(single carrier: SC) 변조 방식을 이용하였으며 시간 영역에서 8번 반복 하여 전송하였다. 전산 모의실험에 사용된 SNR은 표 2에 나타내었다. 표기된 SNR은 표 1에 나타난 송신 신호 레벨에 경로 손실과 PAPR에 따른 클리핑 수행 시 감소되는 파워를 적용한 결과이다.

표 2. SC, CDMA 그리고 OFDA의 SNR

Table 2. SNR of SC, CDMA and OFDM

Ch	Single-Carrier	CDMA	OFDM 8dB clipping	OFDM 6dB clipping	OFDM 4dB clipping
SNR	9.81dB	9.72dB	3.34dB	4.22dB	4.98dB
PAPR	1	1	7.26	5.14	3.85

1) 단일 경로 실험

단일경로 채널인 그림 4에 대하여 BER 성능을 표 3에 나타내었다. 단일 경로이므로 AWGN 채널과 유사하여 SC 전송방식과 CDMA 전송방식을 사용하였을 때는 BER이 0이다. OFDM 전송방식을 사용 하였을 때는 클리핑에 의해 데이터 왜곡이 발생하므로 BER이 0이 아님을 알 수 있다. OFDM의 경우 4dB 클리핑을 수행한 경우가 8dB로 클리핑을 했을 때보다 클리핑되는 양이 많으나 BER 성능이 좋게 나온 것은 SNR이 더 높기 때문이다. 즉, SNR 이득이 클리핑에 의한 왜곡 효과를 상쇄하였음을 알 수 있다.

표 3. 단일 경로 채널 실험 결과

Table 3. Simulation results in single-path channel

	Single-Carrier	CDMA	OFDM 8dB clipping	OFDM 6dB clipping	OFDM 4dB clipping
BER	0	0	7.88E-4	1.13E-4	2.67E-5

2) 2-way 다중 경로 실험

2-way 다중 경로 채널에서의 SC, CDMA, OFDM의 BER을 표 4에 나타내었다. 두 번째 경로의 시간을 5msec, 10msec, 20msec 그리고 크기는 첫 번째 경로의 75%가 되도록 설정하였으며 각각 CH1, CH2, CH3라 하였다.

CDMA 전송방식에서 SF이 8인 경우 Rake 수신단에서 2ms까지 핑거를 잡을 수 있다. 따라서 두 번째 경로가 2ms 이상인 경우에는 다이버시티 이득을 얻을 수 없기 때문에 단일 경로에 비해 BER 성능이 열화된다. 이와 같은 성능 열화는 SC에서도 동일하다. 그러나 SC의 경우에는 다중 경로의 시간이 길어짐에 따라 ISI가 커지지만 CDMA의 경우 주파수 확산 효과와 확산 코드간의 직교성으로 인해 2번째 경로 지연이 길어지더라도 성능에 변화가 적으며 ISI 효과를 감소시켜 SC에 비해 성능이 우수하다. OFDM의 경우 rms 지연시간이 길어지면 Bc가 작아지므로 상대적으로 주파수 다이버시티를 얻을 수 있으므로 지연시간이 긴 경우가 짧은 경우보다 BER성능이 우수하다.

실험 결과 다중 경로의 지연시간이 짧은 경우에는 OFDM에 비해 CDMA의 성능이 우수하며 지연시간이 긴 경우에는 OFDM이 CDMA 보다 성능이 우수함을 알 수 있다.

표 4. 2-way 다중 경로 채널 실험 결과

Table 4. Simulation results in 2-way multi-path channel

	Ch	Single-Carrier	CDMA	OFDM 8dB clipping	OFDM 6dB clipping	OFDM 4dB clipping
1; 1; 1;	Ch1	1.48E-4	1.24E-4	6.99E-3	1.84E-3	8.27E-4
	Ch2	1.72E-4	1.29E-4	3.43E-3	4.77E-4	3.01E-4
	Ch3	1.75E-4	1.28E-4	4.60E-3	5.22E-4	1.00E-4

3) 3-way 다중 경로 실험

3-way 다중 경로에 대한 채널의 delay profile을 표 5에 나타내었다. 두 번째 경로와 세 번째 경로의 크기

를 각각 첫 번째 경로 크기에 73%, 50%가 되도록 설정하였으며 지연시간을 늘려가며 채널을 생성하였다. 해당 채널에 대한 BER 성능 결과를 표 6에 나타내었다. SC의 경우 다중 경로에 의한 ISI가 두 개로 늘어남에 따라 수신 BER 성능이 2-way의 실험에 비해 열화되며 지연시간이 길어질수록 성능이 저조해진다. CDMA의 경우에는 SF가 8이기 때문에 2msec 내에 들어오는 경우인 Ch1의 두 번째 경로에 대해 핑거를 잡아 ISI를 해결할 수 있지만 세 번째 경로는 처리할 수 없기 때문에 2-way의 실험에 비해 성능이 열화되지만 OFDM과 SC에 비해 성능이 우수함을 알 수 있다. 그리고 지연시간이 길어짐에 따라 Rake 수신단에서 핑거를 잡지 못하여 성능이 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있으나 확산 코드의 직교성으로 인해 ISI를 감소시키는 효과가 있으므로 SC에 비해 성능이 우수하다. OFDM의 경우도 다른 기법들과 동일하게 다중 경로의 수가 증가할수록 BER 성능이 저하된다. 그러나 OFDM은 CP로부터 ISI 영향이 SC나 CDMA의 경우보다 적으며 지연시간이 긴 경우 주파수 다이버시티를 얻을 수 있으므로 BER 성능이 SC와 CDMA보다 우수함을 알 수 있다.

위의 실험들을 통해 다중 경로에서 지연시간에 따른 CDMA와 OFDM 전송 방식의 BER 성능을 분석하였다. CDMA의 경우 SF를 크게 하여 다중 경로에 대하여 시간 영역 다이버시티 얻음으로써 우수한 성능을 얻을 수 있으나 전송률 저하로 인해 SF를 크게 하지 못하는 경우가 발생한다. 따라서 수중 채널의 다중 경로 시간이 SF의 길이정도에 해당하는 근거리 통신에는 CDMA를 사용하는 것이 OFDM을 사용하는 것보다 유리하다. 그러나 다중경로의 지연시간이 SF보다 길어지는 경우에는 OFDM 전송방식이 CDMA보다 BER 성능이 우수함을 알 수 있다. OFDM의 경우 PAPR 및 경로 손실을 보전하기 위해 4dB 정도로 클리핑을 적용하여 평균 출력을 올린 것이 클리핑을 적게 적용하여 전송 출력을 back-off 한 것보다 BER 성능이 좋아짐을 알 수 있다. 또한 다중 경로가 존재할 때 지연시간이 긴 경우 Bc 주파수 대역폭이 줄어들어 주파수 다이버시티 이득을 얻는 데 유리하고 CP로부터 ISI 영향을 감소시키므로 CDMA에 비해 BER 성능이 우수함을 알 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 수중 음향 채널이 다중 경로를 갖는 경우 CDMA와 OFDM의 성능을 비교 분석하였다. CDMA의 경우 지연시간이 SF로부터 Rake 수신기를 사용할 수 있는 범위 내에 존재하는 경우에는 시간 다이버시티 이득을 얻을 수 있기 때문에 OFDM에 비해 성능이 우수하였다. Rake 수신기를 사용할 수 없는 경우에도 다중 경로 신호가 직교 코드에 의해 ISI가 감소되어 SC에 비해 성능이 우수함을 보였다. OFDM의 경우 지연시간이 CP로부터 ISI로 인한 영향을 줄일 수 있으며 지연시간이 길 경우 주파수 선택적 페이딩으로부터 다이버시티 이득을 얻어서 CDMA에 비해 성능이 우수함을 보였다.

표 5. 3-way 다중 경로 채널 delay profile

Table 5. 3-way multi-path channel delay profile

		2-way		3-way	
		Delay (msec)	Magnitude (%)	Delay (msec)	Magnitude (%)
11	Ch1	1.5	73%	2.5	50%
	Ch2	2.5		5	
	Ch3	5		10	
	Ch4	10		20	

표 6. 3-way 다중 경로 채널 실험 결과

Table 6. Simulation results in 3-way multi-path channel

	Ch	Single-Carrier	CDMA	OFDM 8dB clipping	OFDM 6dB clipping	OFDM 4dB clipping
11	Ch1	9.49E-3	6.68E-4	3.64E-2	1.53E-2	5.30E-3
	Ch2	1.07E-2	2.36E-3	2.71E-2	1.33E-2	4.14E-3
	Ch3	1.16E-2	2.72E-3	2.92E-2	7.70E-3	4.41E-4
	Ch4	1.21E-2	2.24E-3	1.87E-2	3.45E-3	4.18E-4

## References

- [1] I. A. Dario, I. F. Akyildiz, D. Pompili, and M. Melodia, "Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges," J. Ad Hoc Networks, VOL. 3, No. 3, P257-P279, Mar. 2005.
- [2] K. Fazel, "Performance of CDMA/OFDM for mobile communication system," in Proc. IEEE Int. Conf. Universal Pers. Comm., VOL. 2, P975-P979, Oct. 1993.
- [3] J. Aktman, B.Z. Bobrovsky and L. Hanzo, "Peak-to-Average Power Ratio Reduction for OFDM Modems", Proc. VTC'2003 (Spring), Jeju, S.Korea, 2003.
- [4] J. W. Han, Y. J. Son and K. M. Kim, "Performance Analysis of Acoustic Communication Using OFDM Modulation in Underwater," J. Navigation and Port Research, VOL. 34, No. 10, P769-P774, 2010.
- [5] K. Saraswathi, Netravathi K A and S Ravishankar, "A Study on channel modeling of underwater acoustic communication," International Journal of Research in Computer and Communication Technology, VOL 3, No. 1, Jan. 2014.
- [6] D. D. Tan, T. T. Le and D. S. Kim, "Distributed cooperative transmission for underwater acoustic sensor networks," in IEEE Wireless Communication and Networking Conference Workshops(WCNCW), Shanghai, China, April 2013.

※ 본 논문은 2017년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(변복조 및 동기 알고리즘 구현, 성능검증 및 최적화)