

대한민국 서해, 남해 수중 채널 환경에서 OFDM 파라미터에 따른 실해역 성능 분석

정태건¹ · 임현택² · 임태호^{3*}

Performance analysis of real sea area according to OFDM parameters in the underwater channel environment of the West Sea and South Sea of Korea

Tea-Geon Chung¹ · Hyun-Taek Lim² · Tae-Ho Im^{3*}

¹Graduate Student, Department of Information and Communication Engineering, Hoseo University, Asan, 31499 Korea

²Vice Director, Deputy Director, Incheon Marine Fisheries Cooperation Center, Incheon, 21554 Korea

^{3*}Associate Professor, Department of Information and Communication Engineering, Hoseo University, Asan, 31499 Korea

요 약

본 논문은 대한민국 서해와 남해에서의 거리에 따른 성능분석을 위해 실해역 측정을 했다. 서해와 남해 선박의 거리와 전송을 관점에서 측정된 실해역 데이터를 기반으로 데이터 반복 전송 횟수와 파일럿 심볼 배치 간격 파라미터를 조절하여 서해와 남해 성능 비교를 통해 수중OFDM 시스템을 성능을 분석하였다. 결론으로는 전송율과 거리에 서 남해의 성능을 비교했을 때 파라미터가 같은 조건에서 남해 5km, 서해 1km 거리에서 BER 성능이 남해가 성능이 비슷하였으며, 남해 10km, 서해 3km에서 파일럿 심볼의 배치간격을 $(\Delta f, \Delta t) = (6, 3)$ 의 심볼과 PRB가 반복되는 $(R_f, R_t) = (2, 1)$ 에서 남해는 1078.92bit/s 서해는 1384.57bit/s으로 전송율관점에서도 남해에서 장거리에서 높은 데이터를 보낼 수 있는걸 확인하였다.

ABSTRACT

This paper measured real sea area for performance analysis according to distance from west sea and south sea of Korea. The performance of the underwater OFDM system was analyzed by comparing the performance of the West and South Seas by adjusting the number of data repetitive transmissions and the pilot symbol placement interval parameters based on the real-sea data measured from the distance and Data rate of the West and South Sea vessels. In conclusion, when comparing the performance of the South Sea at the Data rate and distance, the BER performance of the South Sea was similar at the 5 km South Sea and 1 km West Sea under the same conditions. Placement interval of pilot symbol at 10 km of South Sea and 3 km of West Sea is $(\Delta f, \Delta t) = (6, 3)$ and the number of times the PRB is $(R_f, R_t) = (2, 1)$ repeated. We confirmed that we can send high data over long distances in the South Sea.

키워드 : OFDM, 수중 음향통신, OFDM 통신방식, 수중 OFDM통신

Keywords : OFDM, Underwater acoustic communication, OFDM communication system, Underwater OFDM communication

Received 25 March 2020, Revised 30 April 2020, Accepted 27 July 2020

* Corresponding Author Tae-Ho Im(E-mail:taehoim@hoseo.edu, Tel:+82-42-540-9642)

Associate Professor, Department of Information and Communication Engineering, Hoseo University, Asan, 31499 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.8.1086>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

최근 해양 과학기술의 발전과 함께 해양 생물학, 해양 물리학 등 학문적 목적의 다양한 분야와 항만방어체계 등 군사적 목적의 분야, 그리고 지구 온난화, 기후 변화, 수중환경 모니터링, 해양수산 IoT, 해양 광물 모니터링 등에서 활용하기 위해 수중 통신 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, AUV(Autonomous Underwater Vehicle)를 활용한 자원 탐사를 위한 원격작업, 인명구조와 같이 사람이 직접 작업할 수 없는 수중 환경에서의 활용도가 증가함에 따라 수중통신 기술의 중요성이 증가되고 있다[1].

수중에서 사용하는 대표적인 수중 음향통신의 경우 음파 속도(약 1,500m/s)는 육상에서 사용하는 전파 속도(약 30만 km/s)에 비해 매우 느린 속도를 가지게 된다. 게다가 송수신기의 이동과 해수면의 움직임에 의해 도플러가 발생하게 된다. 해양환경의 시공간적인 변동성(계절, 날씨, 조석주기 변화, 해수면이동)도 수중채널에 영향을 미치게 된다[2]. 장거리 수중 통신의 경우 낮은 주파수를 사용할 경우에는 그에 따른 대역제한(band limited)채널이 생기게 된다. 송신된 신호는 대역제한을 겪게 되는 수중채널을 통과하면서 시간영역에서 신호의 확장이 일어나며 인접 심볼에 영향을 미칠 수 있다. 송출된 신호는 해수면과 해저면에 의해 굴절, 반사되어 다중경로를 통해 전달된 후 서로 다른 지연시간을 거쳐 수신된다. 이러한 다중경로들이 수중 환경의 변화함에 따라 발생하면서 통신채널은 시 변동성을 가진다. 다양한 수중환경의 요인으로 인해 수중통신은 육상통신에 비해 어려운 통신환경을 가지게 된다. 수중통신에서 채널을 통과한 신호는 빠르게 변하는 시변채널에 의해 극심한 신호 왜곡을 가지게 된다. 수중 음향 통신 전송방식으로 OFDM(Orthogonal frequency-division multiplexing)에 방식에 대하여 관한 많은 연구가 진행되고 있다[3]

본 논문에서는 수중통신에 적합하다고 연구한 수중 OFDM의 성능 분석을 위해 해양 환경이 서로 다른 서해와 남해에 두 지역에서 수중 음향 OFDM 시스템의 성능을 측정하였다. 이때 설계한 수중 OFDM시스템의 다이버시티와 파일럿 간격이라는 두 파라미터를 변화 시켜 전송률에 따른 수중 음향 OFDM 시스템의 성능을 분석하였다.

II. 수중 OFDM 시스템

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송방식은 여러개의 반송파를 사용하여 다수 반송파를 이용하는 것으로, 각 채널의 전송주기가 증가하게 된다. 이 경우 광대역 전송에서 발생하는 주파수 선택적 채널의 간섭인 ISI(InterSymbol Interference)에 강인하며, CP(cyclic prefix)로 인해 복잡한 채널이 단일 탭으로 근사화 되기 때문에 단일 탭 등화기를 사용하여 보상이 가능하다. 또한 부 채널이 서로 중첩되는 상황에서 인접 채널간의 간섭(ICI)이 발생하지 않는 이유는 각 부 반송파간 직교성이 유지되기 때문이다[4].

$$\Delta f = \frac{1}{T_s} \tag{1}$$

$$B \approx N\Delta f \tag{2}$$

식1과 식2는 반송파 간격과, 직교하는 부반송파가 가지는 대역폭을. 여기서 Δf 는 부반송파 간격을 나타내며, T_s 는 심볼의 주기, B 는 반송파 대역폭 N 은 부반송파 뜻한다. 부반송파 간 직교성(Orthogonality)인 두 정현파 신호의 곱을 적분 했을 때 또는 두 신호인 정현파를 내적인 결과가 0인 것을 뜻한다[5]. 이 복소 정현파들의 경우 기본 주기와 같은 길이를 갖는 시간제한(Time-limited)과 복소 정현파 사이에서는 서로 직교성이 성립한다. 이를 아래 수식으로 나타내었다.

$$\frac{1}{T} \int_0^T e^{j2\pi f t} dt = \frac{1}{T} \int_0^T e^{j2\pi \frac{k}{T} t} dt \tag{3}$$

$$= \frac{1}{T} e^{j2\pi \frac{(k-i)}{T} t}$$

$$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{k}{T} \frac{T}{N} n} e^{-j2\pi \frac{i}{T} \frac{T}{N} n} \tag{4}$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{(k-i)}{N} n} = \begin{cases} 1, & k = i \\ 0, & otherwise \end{cases}$$

적분 구간이 기본주기의 정수배가 아닌 경우에는 직교성이 만족되지 않는다. 이는 복소 정현파와 구형파 윈도우(rectangular window)의 곱으로 표현된다. 다른 다중 반송파 변조 방식과 달리 부반송파 간 보호 구간을 따로 둘 필요 없어 신호의 한 직교성에 부반송파 중첩이 가능하다. 따라서 사용 가능한 대역폭 대비 전송률이 다른 다중 반송파 변조방식에 비해 큰 폭으로 증가하는 장

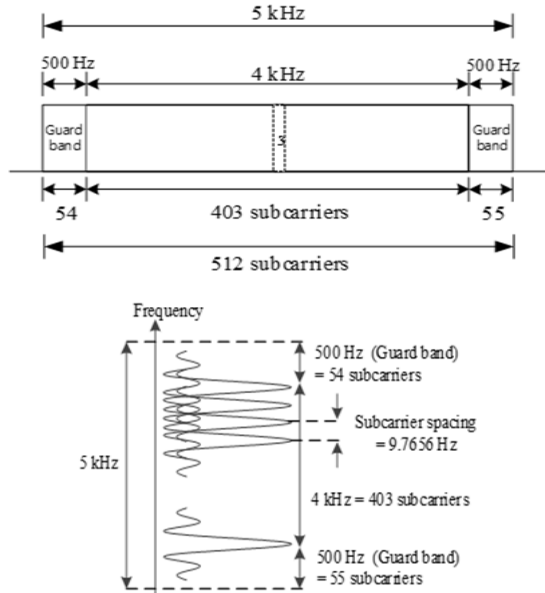


Fig. 1 OFDM subcarrier configuration in the frequency domain

점을 갖는다. 심볼을 전송하게 되면 고속의 직렬 데이터 심볼을 여러 개의 병렬 데이터 심볼로 나누어 전송하게 된다. 이때 부반송파의 개수만큼 심볼간 긴 전송 주기를 가지고 있기 때문에, 광대역 고속 전송에서 나타나는 주파수 선택적인 특성은 심볼 간 간섭이 없는 주파수 비선택적(FrequencyNon-Selective)인 특성을 갖게 된다. OFDM 전송신호는 주파수 선택적 특성을 가지는 다중 경로 채널을 통과할 때 ISI가 발생한다. 이때, OFDM 시스템의 부 반송파간 직교성이 깨지며 ICI(Inter-Carrier Interference) 또한 발생하게 된다. ICI와 ISI를 방지하기 위해서는 시간 영역에서 매 심볼마다 보호 구간을 두어야 한다. 전송 신호가 채널을 통과할 경우, 시간 지연에 따른 이전 심볼이 다음 간섭하는 것을 방지하기 위해 OFDM 심볼의 뒷부분의 신호를 복사하여 OFDM 심볼 앞부분에 붙인다[6].

본 논문에서의 수중 OFDM 파라미터인 그림1, 그림2와 같이 OFDM 프레임 구조는 이전 연구에서 실측된 채널 분석 결과를 바탕으로 기지국과 수중 센서 노드 간 통신에서 상·하향 링크 모두 동일한 프레임 구조를 사용한다.

그림1에 주파수 축에서의 OFDM 부반송파 구조가 나타난다. OFDM 심볼은 여러 부반송파로 구성되며, 그

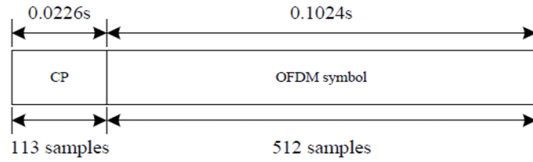


Fig. 2 OFDM symbol structure on time domain

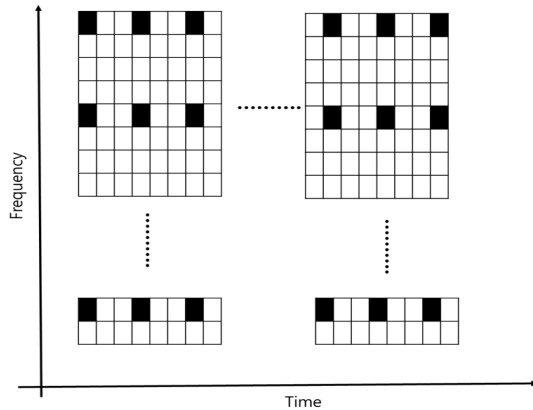


Fig. 3 Pilot arrangement of OFDM system

림2와 같이 한 개의 프레임은 두 개의 프리앰블과 심볼과 54개의 OFDM 심볼로 구성된다. 이때, 각 심볼의 길이는 125 ms이며, 한 개의 프레임은 7초의 길이를 갖는다. 최대 다중경로 길이보다 긴 CP를 프레임 전단부에 붙여 전송하여 직교성을 유지하게 된다. CP 길이는 기존 연구 결과에 기반하여 22.6ms로 설정하였다[7]. 하나의 OFDM 심볼은 시스템이 사용하는 대역폭과 FFT사이에 따라 포함하는 부반송파 개수가 달라진다. 이러한 부반송파는 데이터 전송을 위한 데이터 부반송파와, 채널 추정을 위한 파일럿 부반송파로 구성된다[8]. 파일럿 부반송파의 전송은 채널 추정, SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio)과 같은 채널 환경 따른 신호품질측정, 주파수 오프셋 추정에 사용된다. 아래의 그림3에서 N개의 심볼로 구성된 부 프레임에서는 채널의 최대 지연 확산과 데이터 전송률을 고려해 파일럿의 간격을 각각 2, 4, 6으로 설정했고, 빠르게 시변하는 채널에 적합한 Comb구조를 사용하여 OFDM 시스템에서는 그림 3과 같이 채널 추정을 위해 OFDM 심볼내에 파일럿 심볼을 적절한 간격으로 배치하여 전송한다. 본 논문에서는 주파수 도메인에서의 파일럿 배치였다. 파일럿 심볼 간격을 Δf , 시간 도메인에서의 간격을 Δt 라 설정하였을 때 간격을 배치하였다. 이 때 주파수와 시간 영역에서

파일럿 간격은 각각 채널의 주파수와 시간 선택성에 기 반하여 설정된다. 주파수 영역에서의 파일럿 신호간의 간격은 다음 식을 만족해야 한다[9].

$$S_f \leq 1/\tilde{\tau}_{\max} \quad (5)$$

여기서 $\tilde{\tau}_{\max}$ 는 채널의 최대 지연 확산값을 나타낸다. 상관 대역폭은 여러 근사 관계식이 있지만 $\tilde{\tau}_{\max}$ 의 역수로 도 근사값을 구할 수 있다[10].

시간 영역에서의 파일럿 신호간의 간격은 다음 식을 만족해야 한다.

$$S_t \leq 1/\tilde{f}_{spread} \quad (6)$$

여기서 \tilde{f}_{spread} 는 Doppler 확산값을 나타낸다. 상관 시간은 여러 근사 관계식이 있지만 \tilde{f}_{spread} 의 역수로 도 근사값을 구할 수 있다.

Table. 1 Underwater OFDM transmission parameters used in the experiment

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
Channel coding	Convolutional coding
Coding rate	1/2
Modulation	QPSK
Repetition	F(1,2,4,8), T(1,3,9)
Pilot spacing	F(2,4,6), T(1,2,3)

본 논문에서 사용된 수중 OFDM 시스템은 표1과 같 이 파라미터가 설계되어있다. 표1의 수중 OFDM 파라 미터 기준으로 그림3의 경우와 같이 6개의 OFDM 심볼 을 8개의 PRB(Physical Resource Block)단위로 묶어서 전송하였다. 이 때 전송되는 프레임의 길이는 7초로 설 정하였으며, 그림3에서 같이 주파수 도메인에서 8개의 PRB가 시간 도메인에서 9번 전송되어 총 72개의 PRB

가 전송된다. 이러한 시스템 구조에서 안정적인 통신을 위해 송신단에서 각 PRB에 동일한 데이터를 반복하여 전송하고, 반복되는 데이터에 LLR combining 다이버시 티 기법을 적용하였다. 반복되는 PRB의 개수가 증가할 수록 다이버시티 성능이 향상하며 통신 성능도 우수해 지는 반면, 데이터 전송률이 감소하게 된다.

III. 서해, 남해 수중채널 분석

3.1. 실험역 측정 방식

수중 통신이 이루어지는 수중 채널 환경은 위치와 시 간에 따라서 큰 차이를 보이게 된다. 본 논문에서는 이 에 대한 연구를 수행하고자 서해와 남해라는 서로 크게 다른 특성을 지닌 두 지역에서 수중 음향 OFDM 시스템 의 성능을 측정하였다. 그림 4,5에는 실험이 수행된 태 안(서해)과 거제도(남해)의 측정 장소와 측정 환경에 대 한 정보가 나타난다.

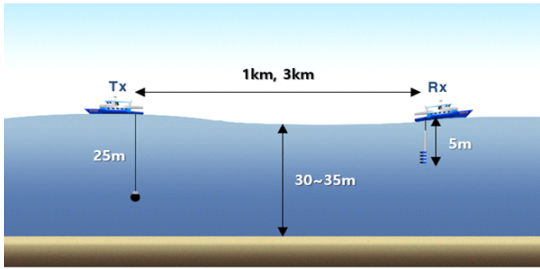
그림4는 서해의 측정 장소는 GPS를 통해 선박 간 거 리를 1km(송신:36°48'39.4"N126°06'22.8"E 수신:36°48' 17.8"N 126°06'57.5"E), 3km(송신:36°49'25.9"N 126° 06'35.0"E 수신:36°48'10.8"N 126°06'51.7"E) 거리로 이 격시킨 후 정박하여 측정을 수행하였다. 측정 당시 수심 은 약 30~35m였으며 이 때 송신 센서의 깊이는 수면으 로부터 약 25m, 수신 센서의 깊이는 수면으로부터 약 5m에 위치시켰다.

그림5의 경우 남해의 측정 장소는 GPS를 통해 선박 간 거리를 5km(송신:34°59'19.33"N 128°47'06.58"E 수신: 35°00'36.07"N128°44'10.30"E), 10km(송신:34°58'02.67"N 128°50'04.27"E 수신:35°00'36.07"N 128°44'10.30"E) 거리로 이격시킨 후 정박하여 측정을 수행하였다. 측정 당시 수심은 약 15~20m였으며 이 때 송신 센서의 깊 이 는 수면으로부터 약 3m, 수신 센서의 깊이는 수면으로 부터 약 10m에 위치시켰다. 변조된 복소 심볼은 반복 전 송 과정을 통해 주파수와 시간 축에서 반복된다. 그 후 심볼은 변조 과정을 통해 시간 축 신호로 최종적으로 변 환된다.

DAQ장비를 이용하여 DAC를 수행한다. 전환된 아 날로그 신호를 송신 증폭기를 통해 증폭한 뒤 트랜스듀 서에서 음파로 송신된다. 이후 수신단에서 수중 채널을 통과한 신호를 수신한 뒤, 수신 증폭기에서 신호레벨을

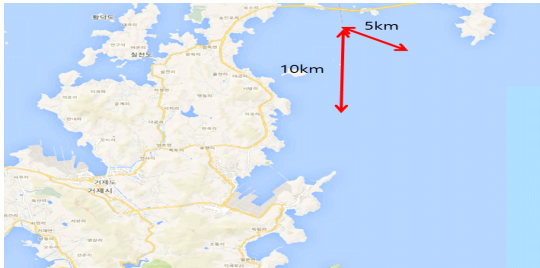


(a) 1 and 3km Measuring location

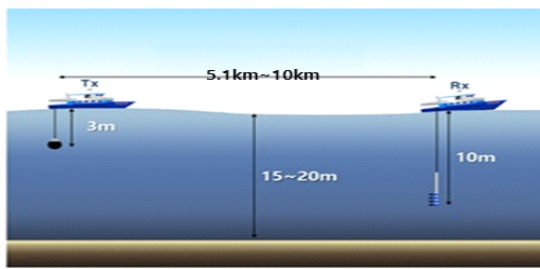


(b) measurement environment

Fig. 4 West Sea Ship Measurement Location and Measurement Environment



(c) 5 and 10km Measuring location



(f) measurement environment

Fig. 5 South Sea vessel measurement location and measurement environment

증가시키고, DAQ에서 데이터 수집 및 ADC한다. 이후 CP를 제거한 후에 신호로부터 데이터를 검출한다. 본 논문에서 채널 추정 방식은 선형 보간법을 사용하였다. FFT 연산 후 파일럿 부반송파를 통해 추정된 채널에 대

하여 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.

3.2. 실험역 수중 특성 분석

수중 채널의 상관 대역폭과 상관 시간을 고려하여 수중 OFDM 통신프레임의 파일럿 구간과 보호 구간의 길이를 설계 할 수 있다. 상관 대역폭은 지연 확산 값을 통해서 도출 가능하며 상관 시간은 도플러 스펙트럼을 통해서 도출이 가능하다. 이를 위해 서해와 남해에서 측정된 실측 데이터를 기반으로 상관대역폭과 상관시간에 대한 분석을 수행하였다. 최대 지연 확산값의 추정은 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{\tau}_{\max} = \arg \text{last}\{P_{CIR}(l) > \lambda_{CIR}\} \quad (7)$$

$$P_{CIR}(l) = 10 \log_{10}(|\tilde{h}(l)|^2 / \max|\tilde{h}(l)|^2) \quad (8)$$

여기서 $P_{CIR}(l)$ 과 λ_{CIR} 은 각각 정규화된 전력값과 문턱값을 의미한다. $\tilde{\tau}_{\max}$ 은 추정된 최대 지연 확산값을 의미한다. 최대 지연 확산값은 λ_{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 최대 초과 지연이 문턱값을 넘어서는 각 다중 경로의 크기는 고려하지 않기 때문이다. 다른 지표로는 RMS(Root - Mean -Square) 지연 확산값을 사용한다. RMS 지연 확산값은 다음과 같이 정의된다[11].

$$\tilde{\sigma}_{\tau} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \quad (9)$$

여기서 $\tilde{\sigma}_{\tau}$ 는 2차 중심 모멘트의 제곱근으로써 RMS 지연 확산값을 의미한다. 사용한 주파수 대역과 이격시킨 거리, 센서 배치, 송출 전력의 차이에 따라 지연확산의 차이 등을 확인할 수 있으며 들어온 신호 중 직접파의 크기를 최대로 하여 정규화를 시킨 후 평균값과 최대값을 그래프로 나타내었다[12]. 그림 6에 서해(태안)에서 측정한 최대 지연 확산값의 분포도가 나타난다. 서해에서 선박 간 거리 5km에서 환경을 측정했을 때 10dB의 문턱값에서 최대 8.3ms의 지연확산값이 나타났으며, 15dB의 문턱값에서는 최대 8ms의 지연 확산값이 나타났다. 그림 7에 서해(태안)에서 측정한 최대 지연 확산

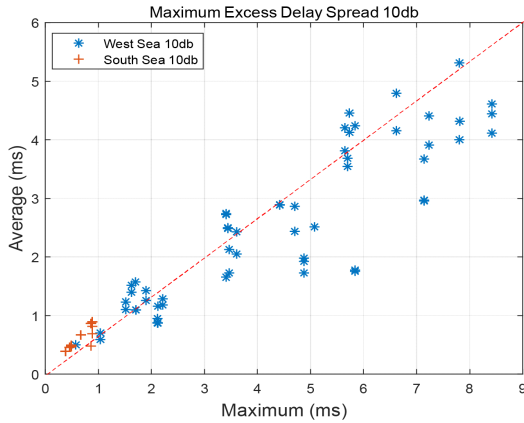


Fig. 6 The distribution of the maximum delay spread value of the South Sea and West Sea (10dB)

값의 분포도가 나타난다. 서해에서 선박 간 거리 5km에서 환경을 측정했을 때 10dB의 문턱값에서 최대 8.3ms의 지연확산값이 나타났으며, 15dB의 문턱값에서는 최대 8ms의 지연확산값이 나타났다. 그림 6,7은 남해에서 측정된 송신파워는 30dB이며 5.1km에서 환경을 측정 한 Maximum Excess 지연확산으로 10dB일 때 최대값 0.9ms이며, 15dB일때 최대값은 2.5ms이다. 수중음향 통신에서는 도플러 확산의 따라 주파수 오프셋에 의한 OFDM 직교성이 무너져 인접채널 간섭(ICI)가 민감하므로 부반송파 간 직교성이 유지되는 범위내에서 부반송파 대역폭과 심볼 주기를 조절해야 한다. 또한 다중 경로에 따른 인접심볼 간섭(ISI)를 해결하기 위하여 OFDM 심볼 사이에 최대 지연확산(Maximum delay spread)보다 긴 보호구간을 삽입해야한다. 이와 같이 OFDM 전송 기법을 수중음파채널 환경에 적용하기 위해서는 수중 음파환경의 모델링을 통하여 상관대역폭 및 상관 시간을 고려하여 OFDM 시스템을 설계하여야 한다. 그러나 수중채널은 앞에서 설명했듯이 주파수, 거리, 수온, 염도, 수압, 풍속, 해저면 성분 등에 영향을 받기 때문에 모든 요소를 반영하는 것은 거의 불가능하여 확정적, 통계적 모델링이 존재하지 않는다. 현재로서 대한민국의 대부분(서해 남해 동해)의 연구는 실험하고자 하는 각 지역의 실패역의 실험 데이터와 해양 환경자료 분석을 통하여 수중 환경의 예측을 하고 있다. 도플러 확산수중 통신의 전송률에 직접적인 관계를 갖는 채널의 상관 시간은 다중 경로 채널 환경과 해류, 송수신기의 이동 등에 의한 영향을 받는다. 이러한 수중 채널 환경에서 통

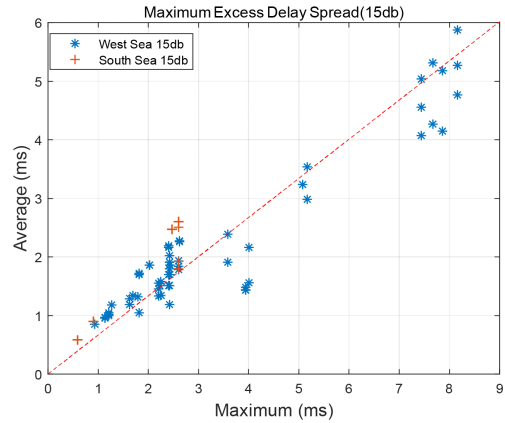


Fig. 7 The distribution of the maximum delay spread value of the South Sea and West Sea (15dB)

신의 전송효율을 높이기 위해서는 채널의 상관시간을 파악해야 하며, 이를 위해서는 도플러 확산에 대한 분석이 수행된다.

도플러 확산은 송신센서와 수신센서가 해류, 파도 등에 의해 상대적인 움직임이 발생하여, 통신채널이 시간에 따른 변화를 겪게 되어 이것이 주파수 상에서 넓게 늘어지며 확산하는 효과를 말하며, 상관시간은 아래 식에서 보는 바와 같이 도플러 확산의 역으로 계산이 가능하다.

$$T_0 = \frac{1}{f_d} \tag{10}$$

식 10은 사용하여 상관시간을 추정하기 위하여 측정 데이터 분석을 통해 도플러 확산을 구하였다.

그림 8, 9에 남해와 서해의 도플러 스펙트럼이 나타난다. 그림8의 경우 -15dB로 설정했을 때 3hz까지 변화가 있었으며, 남해의 경우 -15dB로 설정했을 때 1.2Hz로 나타났다. 12kHz를 사용하여 전송한 신호를 수직 채널환경과 수평채널 환경에서 수신한 데이터의 기저대역 신호를 나타내었다. 이상적인 채널환경에서 수신된 신호는 주파수 영역에서 임펄스로 나타난다. 그래프에서 보이는 바와 같이 수중 채널 환경을 통과한 신호는 주파수 상에서 늘어지는 현상이 발생함을 확인할 수 있다. 하지만 실패역 측정 데이터에서는 수중 채널환경에서 발생하는 다양한 잡음으로 인해 정확한 도플러확산 범위 추정이 불가능하다. 수신된 신호의 주파수 영역에서 전력이 약 -15dB 지점까지를 유효 도플러 확산 범위로 설정하였다.

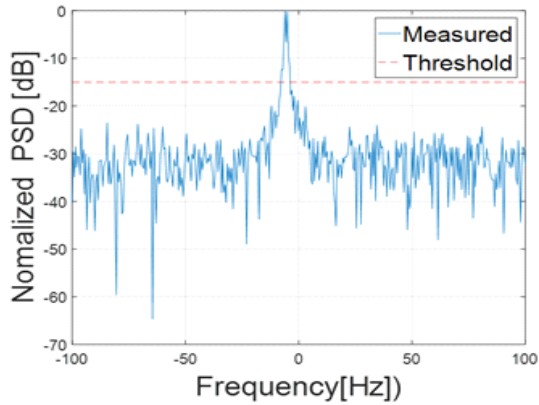


Fig. 8 West Sea Doppler spectrum

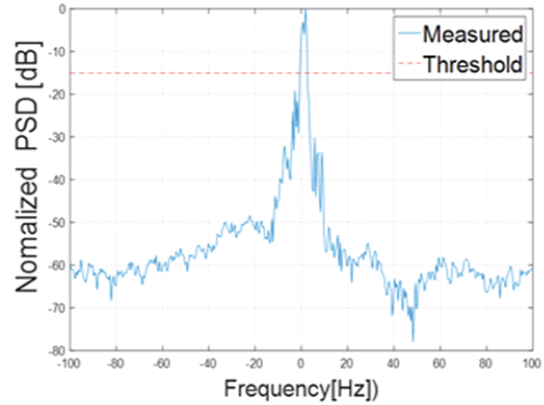


Fig. 9 South Sea Doppler Spectrum

IV. 서해 및 남해, 실해역 수중통신 성능분석

본 측정 남해와 서해에서의 실해역 측정데이터분석을 통해 얻은 데이터를 표2,3에 정리하였다. Modulation 및 Coding rate 고정하였으며, 표2에서는 남해에서 측정 한 결과로 거리는 5.1km, 10km, 표3은 서해의 측정 결과로 거리는 1km, 3km로 각각 이격시켰으며, 파일럿 간격과 Repetition 차이에 따른 전송율을 정리하였다.

남해의 데이터인 표 2와 같이 5.2km, 10km에서 파일

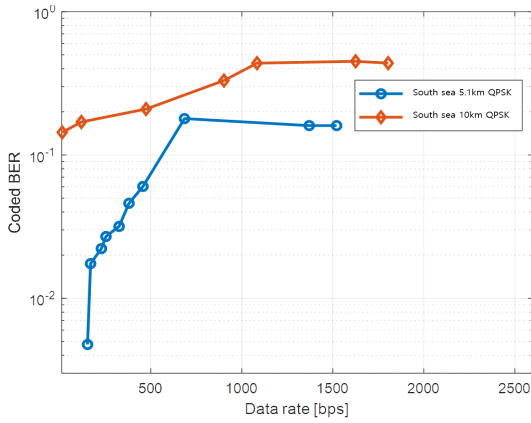
럿 심볼의 배치간격을 $(\Delta f, \Delta t) = (6, 1)$ 로 좁게 설정했을 경우와 PRB가 반복되는 횟수를 $(R_f, R_t) = (1, 1)$ 로 적게 설정하였을 때 전송율이 가장 높았으며, PRB가 반복되는 횟수가 비교적 많은 $(R_f, R_t) = (4, 9)$ 인 경우 파일럿 심볼 배치 간격을 $(\Delta f, \Delta t) = (6, 3)$ 으로 넓게 설정하였을 때, 전송율이 가장 낮은걸 볼 수 있다. 표 3 같이 서해의 3km 경우 파일럿 심볼의 배치간격을 $(\Delta f, \Delta t) = (6, 3)$ 로 좁게 설정하였을 때 PRB가 반복되는 횟수를 $(R_f, R_t) = (2, 1)$ 로 적게 설정 하였을 경우 전송율이 가장 높았으며, 1km 데이터에서 PRB가 반복되는 횟수가 비교적 많은 $(R_f, R_t) = (2, 1)$ 인 경우와 파일럿 심볼 배치 간격을 $(\Delta f, \Delta t) = (1, 1)$ 으로 넓게 설정하였을 때, 전송율이 가장 낮은걸 볼 수 있다. 표 2, 표3에서 파일럿 심볼의 배치간격 $(\Delta f, \Delta t) = (6, 3)$ 과 PRB가 반복되는 횟수를 $(R_f, R_t) = (2, 1)$ 의 데이터

Table. 2 Transmission parameters per case in South Sea

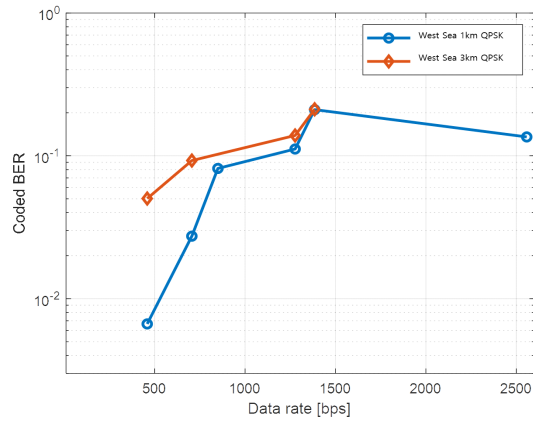
distance (Km)	Modulation	Coding rate	Pilot spacing freq, time]	PRB Repetition freq, time]	Transmission rate [bits/s]
5.1	QPSK	1/2	4, 2	1, 9	152.2285
			6, 3	1, 9	168.9737
			4, 2	2, 3	228.3429
			6, 3)	2, 3	253.4606
			2, 1	1, 3	325.7143
			6, 3	4, 1	380.1909
			4, 2	1, 3	456.6857
			4, 2	2, 1	685.0286
			4, 2	1, 1	1370.057
10	QPSK	1/2	6, 3	1, 1	1520.763
			6, 3	4, 9	24.26142
			6, 3	4, 1	218.3528
			6, 3	1, 1	873.4114
			2, 1	1, 1	658.2857
			6, 3	2, 1	1078.92
			4, 2	1, 1	1844
			6, 3	1, 1	1860

Table. 3 Transmission parameters per case in West Sea

distance (Km)	Modulation	Coding rate	Pilot spacing freq, time]	PRB Repetition freq, time]	Transmission rate [bits/s]
1	QPSK	1/2	2, 1	1, 1	458.85714
			4, 2	1, 3	705.71429
			4, 2	2, 1	849.71429
			4, 2	2, 1	1276.5714
			6, 3	2, 1	1384.5714
3	QPSK	1/2	4, 2	1, 3	2557.1429
			6, 3	2, 3	458.85714
			2, 1	2, 1	705.71429
			4, 2	2, 1	1276.5714
			6, 3	2, 1	1384.5714



(a) Coded BER according to Transmission rate of the South Sea



(b) Coded BER according to Transmission rate of the west sea

Fig. 10 Coded BER of OFDM system measured in West Sea and South Sea

를 비교해봤을 때 남해 10km는 1078.92bit/s, 서해에서는 1,3km에서는 1384.5714bit/s로 남해에서의 장거리에서도 서해의 1,3km와 비슷한 성능의 전송율을 내는 것을 확인하였다.

그림 10은 서해와 남해에서 전송율에 따른 OFDM 시스템의 Coded BER을 나타내었다. 그림10-(a)에 보는 바와 같이 서해 태안에서는 3Km에서는 통신 성능이 매우 불안정한 것을 확인할 수 있으며, 1Km인 경우에도 높은 전송율 전송은 불가능하였다. 2016년 서해에서 측정한 수중 OFDM시스템의 성능이 5km에서 BER이 0.3733으로 성능이 남해와 같이 장거리 통신이 가능하였다. 본 측정이 수행된 시기의 수중 채널 환경적 변화 의한 상관대역폭(-15.4khz)과 Maximum excess delay spread(8ms)에 의해 수중OFDM시스템의 CP길이를 영향이 발생해 ISI/ICI가 위와 같이 통신성능에 영향이 있는 걸 알 수 있다. 서해와 남해의 maximum delay spread 10dB 봤을 때 남해는 1ms, 서해는 9ms로 서해가 남해보다 수중 환경의 영향이 커 5.1km와 10km에서의 성능이 그림10에서 같이 서해의 1km, 3km BER이 비슷하게 나왔다. 서해의 경우 실패역에서 측정한 데이터를 보면 1km에는 458bit/s에서 Error free, 3km에서는 1415bit/s error free가 발생하는 경우가 있었다. 또한 남해의 경우 5km에서는 1096bit/s에서 Error free, 10km에서 493bit/s에서 Error free 성능이 나타났다. 서해와 남해의 성능을 비교했을 때 파라미터가 같은 조건에서 남해 5km, 서해 1km 거리에서 BER 성능이 남해가 성능이 비슷하였으며, 남해 10km, 서해 3km에서 파일럿 심볼의 배치간격

$(\Delta f, \Delta t) = (6, 3)$ 과 PRB가 반복되는 횟수를 $(R_f, R_t) = (2, 1)$ 남해는 1078.92bit/s 서해는 1384.57bit/s으로 datarate관점에서도 남해에서 장거리에서 높은 데이터를 보낼 수 있는 걸 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 서해와 남해의 채널 환경적 요인인 주파수와 시간 영역에서 분석하였다. 또한, 수중 채널 추정을 위하여 많은 파라미터 변화(파일럿과 Repetition 횟수를 조정)에 따른 전송율 관점에서 실제 수중에서 수중 OFDM 시스템을 사용한 측정 데이터 기반으로 서해와 남해를 전송율 따른 BER성능을 비교하였다. 서해의 1km와 남해 5km에서 QPSK을 케이스에서 같은 전송율에서 BER 성능이 비교했을 때 성능 차가 없음을 확인하였다. 향후 연구에서 향후 수중 OFDM 시스템을 사용한 영상 및 텍스트 데이터 전송시 파일럿과 Repetition 횟수 조정을 통한 전송 방식 설계 및 연구를 진행할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This paper is a research conducted by the Ministry of Maritime Affairs and Fisheries in 2020 with the support of the Korea Maritime Science and Technology Promotion Agency (Development of a Distributed Underwater Observation Control Network)

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2017R1C1B5074 253).

References

[1] N. R. Kim, and J. H. Chung, "Trends of Underwater Communications and Channel Environment Characteristics," *Journal of Korean Society for Internet Broadcasting and Communication*, vol. 9, no. 5, pp. 243-247, Oct. 2009.

[2] A.Wang, B. Li, and Y. Zhang, "Underwater Acoustic Channels Characterization for Underwater Cognitive Acoustic Networks," in *proceeding of the 2018 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City, Xiamen, China*, pp. 223-226, 2018.

[3] M. Jouhari, K. Ibrahim, H. Tembine, and J. B. Othman, "Underwater Wireless Sensor Networks: A Survey on Enabling Technologies, Localization Protocols, and Internet of Underwater Things," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 96879-96899, Jul. 2019.

[4] K. Y. Kim, M. S. Kim, H. L. Ko, and T. H. Im, "Performance analysis of OFDM and CDMA communication methods in underwater acoustic channel," *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, vol. 38, no. 1, pp. 30-38, Jan. 2019.

[5] Y. H. Cho, J. H. Kim, and H. L. Ko, "Performance analysis of Underwater OFDM Systems with Different Pilot Spacings in Western Sea of Korea," *The Journal of Korean Institute of communications and Information Sciences*, vol. 42, no. 12, pp. 2248-2254, Dec. 2017.

[6] J. H. Kim, T. S. Lee, T. H. Im, M. S. Kim, K. L. Ko, and Y. H. Cho, "Performance analysis of pilot symbol spacing for OFDM system on measurement data at West sae," *The Journal of Korean Institute of communications and Information Sciences*, vol. 42, no. 12, pp. 52-53, Jul. 2017.

[7] K.Y. Kim, K. W. Kim, M. S. Kim, T. G. Jeong, and H. L. Ko, "Analysis of underwater channel characteristics at Tae-an sea area," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 43, no. 7, pp. 1191-1196, Jun. 2017.

[8] T. G. Chung, K. W. Kim, T. H. Im, Y. H. Cho, T. S. Lee, and H. L. Ko, "Performance analysis of OFDM system using frequency diversity on West Sea underwater," *Journal of the Korean Institute of Communication Sciences*, vol. 2017, no. 6, pp. 494-495, Jun. 2017.

[9] H. W. Jeon, S. J. Lee, and H. N. Lee, "Underwater Channel Analysis and Transmission Method Research via Coded OFDM," *The Korean Institute of Communication Sciences*, vol. 36, no. 5, pp.573-581, 2011.

[10] Y.S. Cho, "MIMO-OFDM wireless communications with matlab," WILEY, 2010.

[11] H. M. Roudsari, J. F. Bousquet, and G. McIntyre, "Channel model for wideband time-varying underwater acoustic systems," *IEEE OCEANS 2017 Conf., Aberdeen, Scotland*, pp. 1-7, Jun. 2017.

[12] J. P. Kermaol, L. Schumacher, K. I. Pedersen, P. E. Mogensen, and F. Frederiksen, "A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 6, pp. 1211- 1226, Aug. 2002.



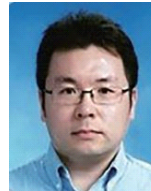
정태건(Chung-Tae Geon)

2018년 호서대학교 정보통신공학과(공학사)
 2018년 호서대학교 대학원 정보통신공학과(공학석사)
 2018~현재 호서대학교 대학원 정보통신공학과
 (공학공학 박사과정)
 관심분야 : 스마트 안테나, 이동통신, IoT 통신,
 수중통신, 해양통신



임현택(Hyun-Taek Lim)

1986년 고려대학교 행정학사 졸업
 2005년 COLORADO STATE UNIV. 행정학 석사
 2019년 호서대학교 정보통신공학 박사
 2012년~2019년 해사안전국 해사산업기술과장
 부이사관
 2019년~현재 인천광역시 해양수산협력관 부이사관
 ※관심분야 : 이동통신, 해양 수산, 해운물류,
 해양통신



임태호(Tae-Ho Im)

2006년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업
 2008년 중앙대학교 전자전기공학부 석사
 2012년 중앙대학교 전자전기공학부 박사
 2012년~2015년 삼성전자 DMC연구소 책임연구원
 2015년~현재 호서대학교 해양IT융합기술연구소
 조교수
 ※관심분야 : 이동통신, IoT 통신, 수중통신,
 해양통신