

대한민국 남해 해역에서 원형 배열 하이드로폰을 이용한 수중 OFDM 시스템의 MMSE 적응 빔포밍 연구

김준호*, 차민혁*, 왕비*, 임태호*, 고태림*

A Study on MMSE Adaptive Beamforming of an Underwater OFDM System Using a Circular Array Hydrophones in the South Sea of Korea

Jun-Ho Kim*, Min-Hyuk Cha*, Fei Wang*, Tae-Ho Im*, Hak-Lim Ko*

요약

본 논문에서는 열악한 수중 음향 채널 환경에서 OFDM 시스템의 성능 향상을 위해 적응 빔포밍 적용 연구를 수행하였다. 중심 주파수는 32kHz이며 대역폭이 4kHz인 OFDM 시스템을 사용하였으며, 한 심볼의 길이는 125ms이다. 부반송파 사이마다 삽입되는 파일럿 심볼을 이용해 MMSE 연산을 통해 가중치를 계산하고 빔포밍을 적용하였다. 사용하는 주파수 대역의 파장에 따라 배열되는 하이드로폰의 간격을 설정하였고, 하이드로폰 개수에 따른 성능 향상 분석을 위해 경상남도 거제시 지세포항 인근 해역에서 실험을 진행하였다. 측정 데이터를 이용하여 SNR과 CIR 특성을 분석하고, 해당 채널에서의 EVM과 coded BER 성능을 분석하였다. 그 결과 하이드로폰이 늘어날수록 MMSE 빔포밍이 적용된 OFDM 수신기의 성능이 증가하는 것을 확인하였으며, 단일 하이드로폰의 성능증가 기대치는 2차함수 형태로 감소하는 것을 확인하였다.

키워드 : 수중 음향 통신, OFDM, 적응 빔포밍, 배열, MMSE

Key Words : Underwater Acoustic Communication, OFDM, Adaptive Beamforming, Array, MMSE

ABSTRACT

In This paper, Adaptive beamforming was used to improve the performance of the OFDM system in UWA channel. the center frequency and bandwidth of the OFDM system were 32kHz, 4kHz. and the length of one symbol was 125ms. beamforming weights were calculated through MMSE operation using pilot symbols inserted between subcarriers and beamforming was applied. the interval of hydrophones arranged according to the wavelength of the frequency band. In order to the performance improvement according to the number of hydrophones, a ocean experiment was conducted in the waters near Jisepo Port, Geoje, Gyeongsangnam-do.

* 이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-실시간 해저재해 감시 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(2022M3J9A107887611)

* 이 논문은 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (분산형 수중관측 제어망 개발)

• First Author : LIGNex1 corp. Maritime R&D Lab., Maritime Sensor System. katsurablue@naver.com

◦ Corresponding Author : Hoseo University Information and Communication Engineering, hlko@hoseo.edu, 중신회원

* Hoseo University Information and Communication Engineering, taehoim@hoseo.edu, 정희원; dwmh86@hoseo.edu; 765969609@qq.com, 정희원

논문번호 : 202203-036-A-RE, Received February 16, 2022; Revised April 16, 2022; Accepted April 16, 2022

SNR and CIR channel characteristics were analyzed using the measured data, and EVM and coded BER performance in the corresponding channel were analyzed. As a result, it was confirmed that the performance of the OFDM receiver to which MMSE beamforming is applied increases as the number of hydrophones increases. However, the performance increase expected of a single hydrophone decreased in the form of a quadratic function.

I. 서 론

수중통신은 전자기파를 사용하는 육상과는 달리 음파를 주로 사용한다. 전자기파는 물을 통해 전달될 경우 매우 높은 감쇄율을 갖기 때문에 비교적 감쇄가 적은 음파를 사용한다. 그러나 음파 또한 사용하는 주파수 대역이 높아질수록 수중 음향 채널의 흡수 계수가 높아지면서 장거리 통신이 어렵다. 수중에서 장거리 통신을 위해 낮은 주파수 대역을 사용할 경우에는 저주파 신호를 송신하기 위한 트랜스듀서의 크기가 매우 커지는 문제가 있으며, 낮은 주파수의 신호를 처리하기 위한 아날로그 소자의 가격도 높아지는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 수중에 다중 배열 소자를 이용한 빔포밍 연구들이 지속적으로 연구되어 왔다. 2016년에는 블록 전송단일반송파 수중 음향 통신시스템에 빔포밍과 다이버시티 기법이 결합된 빔다이버시티 기술을 적용하여 주파수 도메인 등화기(FDE, Frequency Domain Equalizer)에 대한 연구가 수행되었으며¹⁾, 2019년에는 수중음향 채널에서 발생하는 불안정한 sub-Gaussian 간섭을 제거하기 위해 곱셈기와 quasi-Newton 기법을 결합한 최적 가중치 연산 기법을 제안하여, 기존에 제안된 빔포밍 기법들과의 모의실험 비교를 통해 더 높은 SINR과 더 빠른 수렴속도로 간섭을 효과적으로 제거하는 연구가 수행되었다²⁾. 2020년에는 위상 배열소자간 크기 및 위상차로 발생하는 DOA 추정 성능 감소를 극복하기 위해 RMSE(Root-Mean-Square-Error) 기법을 이용하여 신호의 입사각을 보정하여 최적의 신호 방향을 찾는 기법을 제안하고, 모의실험과 수중 탱크에서의 실험을 통해 성능 검증연구를 수행하였으며³⁾, 2021년에는 수중 음향 채널 환경에서 안색이나 벽으로 둘러싸여 NLOS (Non-Line-Of-Sight) 성분만 수신되는 환경을 극복하기 위해 빔포밍과 RAKE 수신기를 결합하여 긴 지연시간을 통해 들어오는 다중경로 성분들을 이용한 통신기법이 연구되었다⁴⁾.

본 논문에서는, 열악한 수중 음향 채널 환경에서 통신 거리 증가와 신뢰도 향상을 위해 광대역 MMSE(Minimum Mean Square Error) 빔 형성기가

적용된 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 통신 시스템 모델과 하이드로폰이 등간격으로 원형 배열되는 구조를 사용하여, 하이드로폰 개수에 따른 시스템의 성능 개선 효과에 대해 연구하였다. 성능 비교 분석을 위해 대한민국 남해 해역에서 실험실 데이터 측정용을 수행하였으며, 측정된 데이터의 채널 분석과, 채널 상태에 따른 원형 배열 구조의 MMSE 광대역 빔포밍 수신기의 성능분석을 수행하였다

II. 수중 OFDM 시스템 모델

본 논문에서 사용된 OFDM 시스템의 송수신 블록도를 아래 그림에 나타내었다.

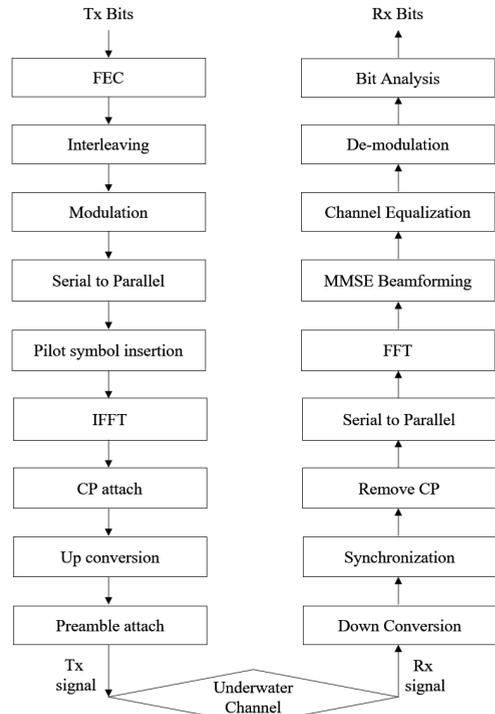


그림 1. MMSE 빔포밍이 적용된 OFDM 시스템의 송수신 블록 다이어그램
Fig. 1. Block diagram of transceiver of OFDM system which MMSE beamformer applied

OFDM 시스템은 전송하고자 하는 데이터들을 각각의 직교하는 부반송파에 실어 전송한다. 부반송파를 직교하도록 배치하기 때문에 차지하는 대역폭이 줄어들게 된다. 각 부반송파가 차지하는 대역폭 또한 상대적으로 좁아지기 때문에 각 신호들이 상관대역폭(Correlation bandwidth) 내에 존재할 수 있게 되어 주파수 선택적 페이딩에 강인하며, 단일 반송파 시스템 대비 전송률을 높일 수 있다. 수중 음향 채널은 음파의 느린 속도와 해저면과 해수면의 반사파로 인해 긴 지연시간을 갖기 때문에 직교하는 부반송파의 간격을 채널의 상관대역폭 내에 존재하도록 설계하는 것이 중요하다^[5]. 본 논문에서는, 대한민국 서해 당진 장고항 앞바다에서 측정된 채널 데이터를 이용해 설계된 OFDM 시스템 모델을 사용한다^[6]. 표 1에 OFDM 시스템의 세부 파라미터를 나타내었다.

표 1과 같이, 본 논문에서는 총 512개의 부반송파를 사용하는 OFDM 시스템을 고려하였다. 이때 OFDM 신호의 중심주파수는 32kHz이고, 대역폭은 4kHz로, Modulation은 QPSK로 설정하였다. 이중 인접 채널간 간섭(ICI, Inter channel interference)을 방지하기 위한 가드 구간과, DC(Direct Current) 성분에 의한 영향을 방지하기 위한 DC 부반송파 구간을 그림 2와 같이 설정하여 가용 부반송파 구간을 설정하였다.

신부에서 채널을 추정하기 위해서는 파일럿 심볼이 필요하다. 이를 위해 병렬화 된 데이터 심볼 사이사이에 일정한 간격으로 파일럿 심볼을 삽입한다. 본 논문에서는 1개의 부반송파 간격으로 파일럿 심볼을 배치하여 400개의 가용 부반송파에 200개의 파일럿 심볼이 삽입된다. 파일럿 심볼은 유사 잡음 시퀀스(Pseudo

표 1. OFDM 세부 파라미터
Table. 1. OFDM Parameters

Parameter	Value
Modulation	QPSK
Center frequency	32kHz
Bandwidth	4kHz
Number of subcarrier	512
Number of data subcarrier	200
Number of pilot subcarrier	200
Number of guard band(left+right)	108
Number of DC subcarrier	4
OFDM symbol length	125ms
CP length	22.6ms
OFDM frame length (2 preambles & 30 OFDM symbols)	4 sec

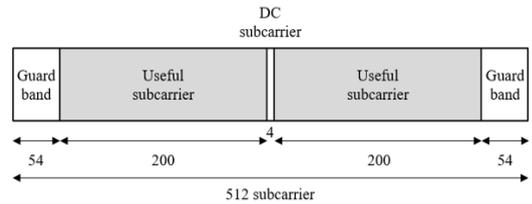


그림 2. 주파수 도메인에서의 OFDM 심볼 구조
Fig. 2. Frequency domain OFDM symbol structure

Random Sequence) 생성기를 통해 생성된 200개의 심볼을 사용하였다. 또한, OFDM 시스템은 광대역 신호가 겪는 채널을 각 부반송파 관점에서 협대역 채널로 변환하여 주파수 비선택적 채널로 근사화 할 수 있다. 이때, 각 부반송파 관점에서는 저속 데이터 전송으로 변환되어 간단한 단일 탭(Single-tap) 등화기를 사용하여 채널의 보상이 가능해진다^[7]. 단, 다중경로 성분으로 인해 인접 심볼 간섭이 존재하게 되면 현재 심볼이 이전 심볼의 영향을 받게 되면서 coherence 대역폭이 작은 주파수 선택적 채널로 인해 시스템의 성능이 크게 저하되며, 이를 방지하기 위해 시간 영역에서 보호 구간을 삽입한다. 본 논문에서는 그림 3과 같이 OFDM 심볼 뒤의 정보 일부분을 복사하여 앞에 붙여넣는 CP(Cyclic Prefix)를 추가하였다.

그림 3에서, CP의 길이는 22.6ms이며, CP를 포함하는 OFDM 한 심볼의 길이는 125ms이다. 총 30개의 OFDM 심볼을 하나의 프레임으로 구성하였다. 프레임의 앞에는 시간 동기를 위한 LFM(Linear Frequency Modulation) 신호와 주파수 오프셋 동기를 위한 ZC(Zadoff-chu) 시퀀스가 프리앰블로 사용되었다. LFM 신호와 ZC시퀀스의 길이는 OFDM 심볼 길이와 동일한 125ms이며, 2개의 프리앰블과 30개의 OFDM 심볼을 포함하는 하나의 OFDM 프레임의 길이는 4초이다. 전송되는 데이터 비트는 순방향 오류 정정 코드(FEC, Forward Error Correction)를 이용하여 채널 코딩된다. 본 논문의 OFDM 시스템은 두 개의 Convolutional code가 결합된 1/3 코딩률의 터보 코드를 사용하였다^[8]. 채널 코딩된 비트열은 순간적인

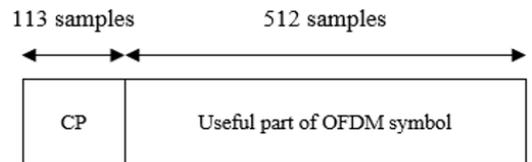


그림 3. 시간 도메인에서의 OFDM 심볼 구조
Fig. 3. Time domain OFDM symbol structure

임펄스 잡음으로 인해 발생하는 Burst error를 분산시키기 위해 비트 데이터의 순서를 블록 단위로 재배열하는 블록 인터리빙을 수행한다. 비트의 심볼 변조 지수가 일 때 한 심볼당 포함하는 비트 수는 다음과 같다.

$$N_{BFS} = \log_2 M \quad (1)$$

이때 블록 인터리버의 행(Row)의 길이는 $L_R = 3 \times N_{BFS}$ 로 설정하였다. 입력 비트의 길이가 N_{bits} 일 때, 블록 인터리버의 열(Column) 길이는 $L_C = N_{bits} / L_R$ 로 정의된다. 인터리버를 통과한 부호화된 비트는 변조기를 통해 심볼로 변조된다. 이후 변조된 데이터 심볼의 OFDM 변조를 위해 병렬 구조로 변환한다. 앞서 생성한 데이터 심볼과 파일럿 심볼을 직교하는 부반송파에 실어 전송하기 위해서는 각 부반송파에 해당하는 곱셈기가 필요하다. 이러한 과정은 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)로 간단하게 구현이 가능하다. 이때 IFFT point 와 데이터 심볼 사이에 추가되는 파일럿 심볼의 간격을 고려하여 병렬화되는 슬롯에 할당해야 한다. 이와 같은 과정을 거쳐 생성된 OFDM 심볼은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$s[n] = \sum_{l=0}^{N_{fft}-1} X_l \times \exp[-j\omega_l n] \quad (2)$$

여기서 $s[n]$ 은 시간에서의 OFDM 심볼이고, N_{fft} 는 IFFT의 크기, X_l 은 l 번째 부반송파이다. 이와 같이 생성된 OFDM 심볼 여러개를 하나의 프레임으로 구성하여 프레임 단위로 신호를 송수신하여 처리한다. 수중음향 채널을 거쳐 다채널 하이드로폰을 통해 수신된 신호들은, 각각 기저대역으로 변환된 이후 LFM 신호의 상호상관 피크 검출을 통해 프레임 동기화가 이뤄진다. 동기화가 이뤄진 OFDM 기저대역 신호는 직병렬 변환되어 FFT를 통해 OFDM 복조된다. FFT를 통해 복조된 각 부반송파 성분들에서 각 하이드로폰 채널마다 동일하게 삽입된 파일럿 부반송파를 이용하여 MMSE 빔포밍을 수행한다. 빔포밍이 완료되어 합성된 OFDM 부반송파들은, 파일럿 심볼들을 사용하여 채널 등화를 수행하고, 심볼 변조와 de-interleaving, 채널 디코딩을 통해 비트로 복조된다⁹⁾.

III. MMSE 적응 빔포밍 수신기

본 논문에서 사용된 MMSE 빔포밍 수신기의 구조

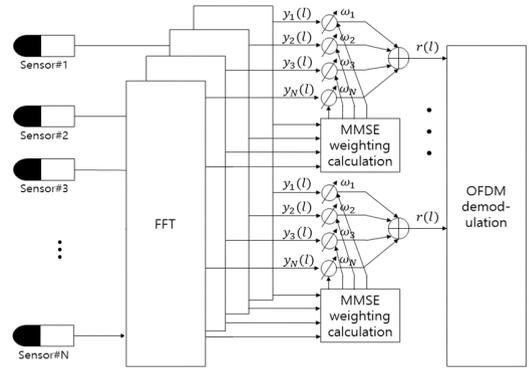


그림 4. MMSE 빔포밍 수신기 구조
Fig. 4. MMSE Beamforming receiver structure

를 그림 4에 나타내었다.

그림 4와 같이, 본 논문에서 사용된 MMSE 빔포밍 수신기는, N개의 하이드로폰마다 FFT를 통해 OFDM 복조를 수행하여 각 파일럿 부반송파마다 MMSE 연산을 통해 가중치를 연산한다. 이때, k 번째 파일럿 부반송파에서 연산된 가중치를 인접한 l 번째 부반송파에 곱한 뒤 합성하여 빔포밍을 수행한다. 이러한 구조는 전체 시스템 대역은 광대역 시스템이지만, 각 부반송파 관점에서는 협대역 시스템으로 전환되어 구현이 가능해진다. k 번째 파일럿 부반송파에 전송되는 레퍼런스 신호를 x_p 라 하고, m 번째 하이드로폰에서 수집한 k 번째 부반송파로 전송된 기준 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_m(k), \quad m = 0, \dots, M-1 \quad (3)$$

이때, $y_m(k)$ 와 $x_p(k)$ 의 최소 평균 자승 오차(MMSE)는 다음과 같다.

$$w_{MMSE} = \arg \min_w E\{e(k)^2\} \quad (4)$$

여기서 기준 신호와 레퍼런스 신호간 오차 $e(k)$ 는 다음 식과 같다.

$$e(k) = w^H y(k) - x_p(k), \quad (5)$$

$$y(k) = [y_0(k), y_1(k), \dots, y_{M-1}(k)]^T$$

위 식을 바탕으로 MMSE를 전개식으로 풀이하면 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 E\{|e(k)|^2\} &= E\{|\omega^H y(k) - x_p(k)|^2\} \\
 &= E\{\omega^H y(k) y^H(k) \omega - x_p^*(k) \omega^H y - x_p(k) y^H \omega + |x_p(k)|^2\} \\
 &= \omega^H R(k) \omega - \omega^H z(k) - z(k)^H \omega + E\{|x_p(k)|^2\}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

식 6에서 $z(k) = E\{x_p^*(k) y_{RIGHT}\}$ 이며, 이때 평균 자승 오차 $E\{|e(k)|^2\}$ 를 최소화 하는 가중치 벡터는 $E\{|e(k)|^2\}$ 의 w^H 에 대한 미분 값이 0일 경우를 가정하여 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial E\{|e(k)|^2\}_{RIGHT} \partial w^H}{= R w - z(k)} = 0
 \tag{7}$$

식 7의 과정을 이용하여 최소 평균 자승 오차를 통해 얻어진 가중치는 다음과 같다.

$$w_{MMSE} = R^{-1} z(k)
 \tag{8}$$

연산된 MMSE 가중치를 k 번째 부반송파와 인접한 l 번째 부반송파에 적용하면 다음 식과 같다.

$$r(l) = w_{MMSE}^H y(l) = \sum_{m=0}^{M-1} w_{MMSE}^*(m) y_m(l)
 \tag{9}$$

MMSE 빔포밍이 적용되어 합성된 신호들은 수신기의 OFDM 복조 과정을 통해 수신 비트로 변환된다 [10].

IV. 하이드로폰 원형 배열 구조 설계

본 논문에서는 등간격 원형 배열 구조에서 하이드로폰의 개수에 따른 MMSE 빔포밍의 성능분석 연구를 위해, 하이드로폰 개수가 최대 12개인 원형 배열 등간격 구조를 설계하였다. 실험을 위해 Neptune Sonar 사의 B/200 하이드로폰을 사용하였으며, 해당 하이드로폰의 물리적 특성과 응답 사양을 그림 5에 나타내었다.

B/200 하이드로폰의 직경은 9mm 이며, 방사 패턴은 omni-directional 한 특성을 보인다. 빔포밍을 위해 소자를 배열할 때, 사용하는 주파수 대역의 파장에 따라 소자의 간격을 결정한다. 본 논문에서 사용된 수중 OFDM 시스템이 사용하는 중심주파수는 32kHz이며, 이때 파장의 길이는 4.6875cm이다. 일반적으로 원형 배열구조의 경우 소자가 배열되는 원의 반지름을 파장의 길이에 따라 결정하게 된다[11]. 파장의 길이를 λ

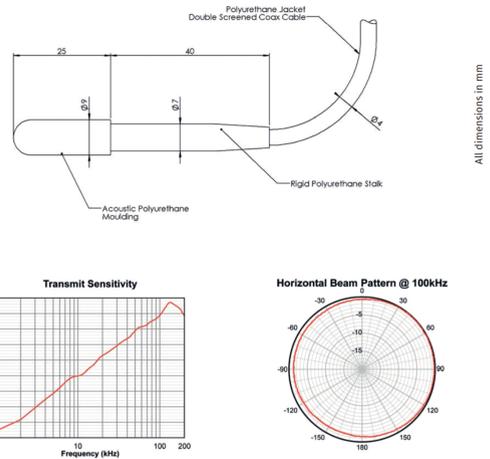


그림 5. B/200 하이드로폰 특성
Fig. 5. Specification of the B/200 hydrophone

라고 했을 때, 원의 반지름 $r = 0.5\lambda$ 일 때의 0° 방향 빔 패턴 시뮬레이션 결과를 그림 6에 나타내었다.

그림 6과 같이 원의 반지름이 반 파장일 경우, 메인 로브의 -3dB 빔 폭은 약 58° 로 생성되며, 메인로브 주변에 생성되는 사이드로브의 크기 또한 -4dB 이하인 것으로 확인되었다. 그러나 해당 구조의 경우 지름이 9mm인 B/200 하이드로폰 12개를 사용하기에는 물리적으로 구현이 불가능하였다. 따라서 하이드로폰 12개가 모두 설치가 가능하도록 반지름 $r = \lambda$ 인 상황에서의 빔 패턴 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 그림 7에 나타냈다.

그림 7과 같이, 원의 반지름이 파장과 같을 경우 메인로브의 -3dB 빔 폭이 약 28° 로 줄어들었으나, 메인로브 반대편에 -2dB 크기의 back-lobe가 생성되는 것이 확인되었다. 해당 시뮬레이션 결과를 바탕으로 32kHz대역에서 12개의 하이드로폰을 원형으로 등간격 배열할 수 있는 치구를 제작하였다. 그림 8과 같이 제작된 원형 배열 구조물에 12개의 하이드로폰을 원의 중심을 기준으로 30° 마다 등간격으로 배열하였다. 이를 이용하여 MMSE 빔포밍 수신기의 하이드로폰

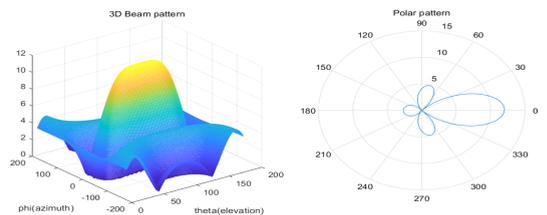


그림 6. $r = 0.5\lambda$ 일 때의 빔 패턴 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation result at $r = 0.5\lambda$

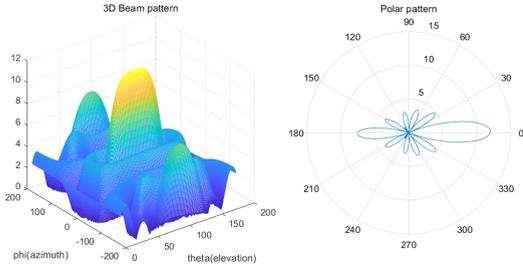


그림 7. $r = \lambda$ 일 때의 빔 패턴 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Simulation result at $r = \lambda$



그림 8. 제작된 원형 배열 하이드로폰 구조물
Fig. 8. Circular array hydrophone structure

개수에 따른 성능분석을 수행하였다.

V. 실험해역 실험 및 데이터 분석

5.1 실험해역 실험

본 논문에서는 II장의 ‘수중 OFDM 시스템 모델’과, III장 ‘MMSE 광대역 빔포밍 수신기’, IV장 ‘하이드로폰 원형 배열 구조 설계’ 내용을 바탕으로, 수중 OFDM 시스템에 적용된 MMSE 빔포밍 수신기의 하이드로폰 배열 개수에 따른 성능분석을 위해 실험해역 실험을 진행하였다. 2021년 6월 대한민국 경상남도



그림 9. 실험해역 실험 장소와 선박 위치
Fig. 9. Experiment site and ship location



그림 10. 수신선박에 설치된 데이터 수집장비
Fig. 10. Measurement equipment installed on the Rx boat

거제시 일운면 지세포항 근처 해역에서 진행되었다. 그림 10에 수신 선박에 설치된 데이터 수집용 장비를 나타내었다.

수신 선박에는 12채널 하이드로폰으로 수신한 데이터를 저장하기 위한 4채널 Rx 앰프(B&K NEXUS 2690) 3대와, 8채널 수집이 가능한 AD 장비(NI USB-6361) 2대가 설치되었으며, 수신신호 관찰을 위한 오실로스코프 및 데이터 저장용 PC가 설치되었다. 그림 11에 송수신 선박과 송수신 하이드로폰에 대한 실험 시나리오와 실험에 사용된 송수신 선박 사진을 나타내었다.

그림 11과 같이 수심이 약 30m 인 환경에서 송신 선박과 수신선박을 1km 가량 떨어진 위치에 정박시키고, 신호 송신을 위한 트랜스듀서와 수신을 위한 배열 하이드로폰을 해저면으로부터 약 3m 위치에 고정시켜 진행되었다. 이때, 사용된 트랜스듀서 TVR 값은 147 dB uPa/V@1m이며, Tx amp는 20 dB로 설정하였다. 12채널의 하이드로폰으로 수신된 575개의 OFDM 프레임이 저장되었으며, 채널 상태와 소자 개수에 따른 OFDM 시스템의 성능 분석을 수행하였다.

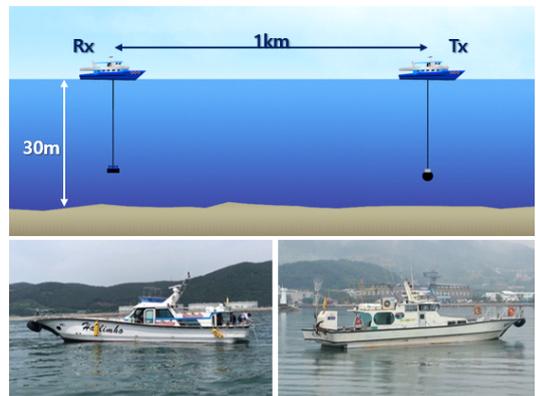


그림 11. 실험해역 실험 시나리오와 송수신 선박
Fig. 11. Experiment scenario and Tx/Rx boat

5.2 측정 데이터 분석

실해역 실험을 통해 측정된 데이터를 이용하여 MATLAB 기반의 채널 및 OFDM 시스템 성능 분석을 수행하였다. 먼저, 저장된 575개의 OFDM 프레임의 시간 동기화가 수행된 상황에서, 신호가 송신된 구간과 신호가 송신되지 않은 zero padding 구간의 수신 신호 전력 비교를 통해 추정된 SNR(Signal to Noise Ratio) 분석 결과를 그림 12에 나타내었다.

그림 12와 같이, 측정 데이터의 각 프레임별 SNR 추정 결과, 가장 낮은 수치는 -33.8336dB였으며, 최고치는 7.5259dB, 평균치는 -4.9021dB로 나타났다. 다음으로, LFM 프리앰블의 상호상관을 이용하여 해당 해역의 채널 임펄스 응답(CIR, Channel Impulse Response)을 분석하였다.

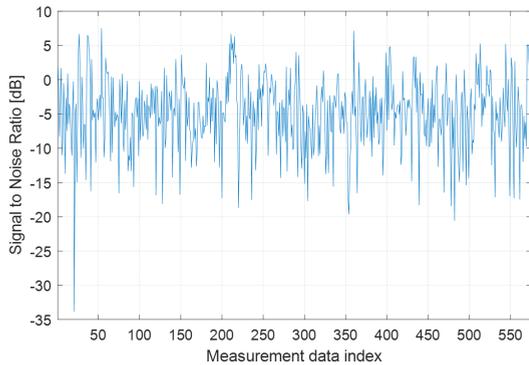


그림 12. 측정 데이터에서 추정된 SNR
Fig. 12. Estimated SNR of measurement data

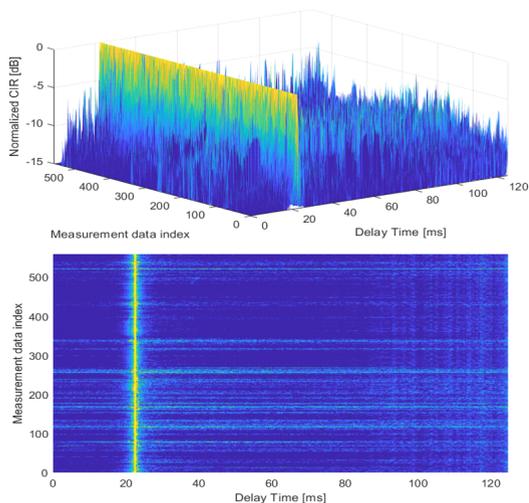


그림 13. 측정 데이터의 채널 임펄스 응답
Fig. 13. CIR of measurement data

CIR 분석 결과, 그림 12와 같이 해당 해역의 최대 지연 시간은 매우 짧으며, OFDM 시스템 모델에서 설정한 CP 구간의 길이인 22.6ms를 넘지 않는 것으로 나타났다. 마지막으로, 등간격 원형 배열 구조의 하이드로폰 개수에 따른 OFDM 시스템의 성능 분석을 위해, 저장된 12 채널의 하이드로폰 측정 데이터에서 3개, 4개, 6개, 12개의 하이드로폰을 사용하여 MMSE 빔포밍을 적용하는 상황을 가정하였다.

그림 14와 같이 하이드로폰 개수가 서로 다른 4가지 경우와 1번 채널의 하이드로폰만을 사용하는 환경에서, 각 채널의 데이터에 MMSE 빔포밍을 적용하여 OFDM 신호의 EVM(Error Vector Magnitude)와 coded BER(Bit Error Rate) 성능을 비교 분석하였다 [12].

그림 15와 같이 MMSE 빔포밍을 적용했을 경우 EVM 수치가 전체적으로 감소함을 확인할 수 있다. 반면에 그림 15의 오른쪽 그림과 같이 특정 구간을 확대해 보면, MMSE 빔포밍이 적용된 경우에는 하이드로폰의 개수에 따른 성능 차이가 크지 않았다. 평균 EVM 수치를 비교해 보면, 3개의 하이드로폰을 사용했을 경우 omni보다 7.4283dB 감소하였으며, 4개의 하이드로폰을 사용한 경우 7.2899dB, 6개의 하이드로폰을 사용한 경우 7.3543dB, 마지막으로 12개의 하이드로폰을 모두 사용했을 경우 8.5392dB 감소함을 보였다. 다음으로, 각 OFDM 프레임 데이터의 하이드로폰 개수에 따른 MMSE 빔포밍 적용시의 coded BER 성능 분석 결과를 그림 16에 나타내었다.

그림 16의 결과와 같이, 평균 coded BER이 3개의 하이드로폰을 사용했을 경우 omni보다 0.0175 감소하였으며, 4개의 하이드로폰을 사용한 경우 0.0244, 6개의 하이드로폰을 사용한 경우 0.0205, 마지막으로

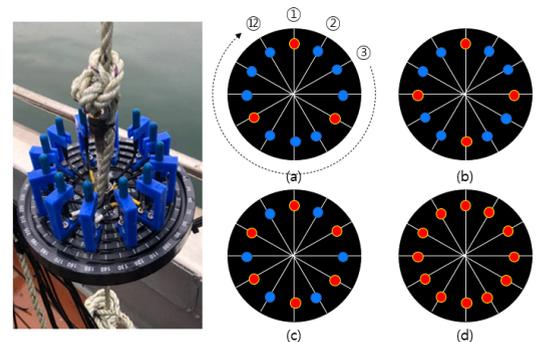


그림 14. 하이드로폰 개수에 따라 선택되는 등간격 원형 배열 소자
Fig. 14. Equal spacing circular array elements selected according to the number of hydrophones

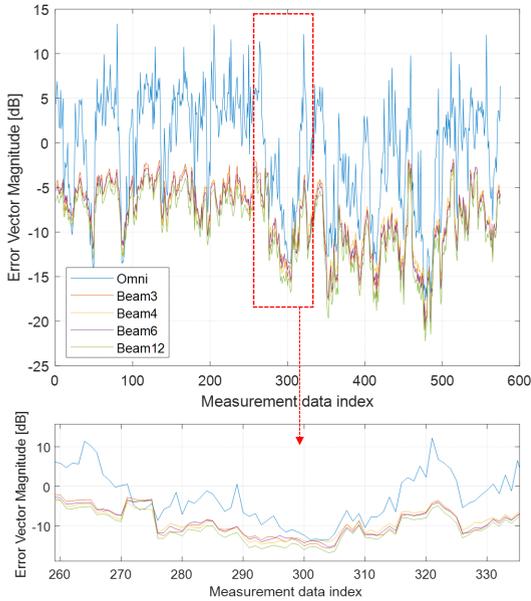


그림 15. 하이드로폰 개수에 따른 EVM 분석 결과
Fig. 15. EVM analysis result according to the number of hydrophones

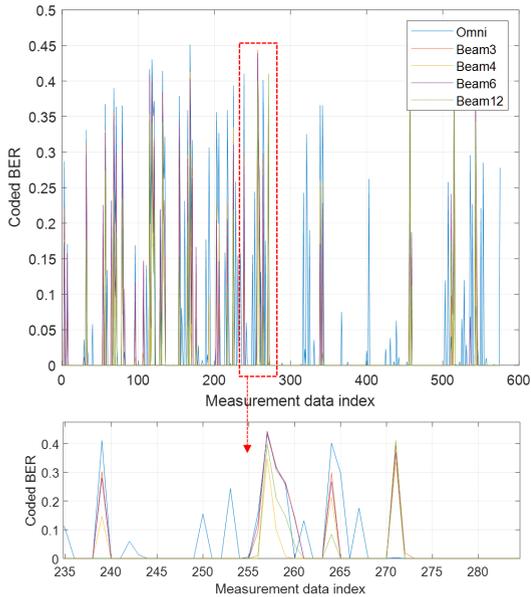


그림 16. 하이드로폰 개수에 따른 BER 분석 결과
Fig. 16. BER analysis result according to the number of hydrophones

12개의 하이드로폰을 모두 사용했을 경우 0.0285 감소함을 보였다. EVM 분석 결과와 coded BER 분석 결과를 표 2에 정리하였다.

표 2의 분석결과와 같이, 등간격 원형 배열 하이드

표 2. EVM, coded BER 분석 결과
Table. 2. Analysis results of EVM, BER

	Omni	3 Beam	4 Beam	6 Beam	12 Beam
Average EVM [dB]	-0.7846	-8.2129	-8.0745	-8.1389	-9.3238
Average coded BER	0.04167	0.02415	0.01730	0.02121	0.01314

로폰의 개수에 따른 MMSE 빔포밍의 성능증가를 확인하였다. 다만, 하이드로폰 개수를 4개에서 6개로 증가시킨 경우 평균 EVM 수치는 감소하였으나, 평균 coded BER은 증가하는 것을 확인하였다. 이는 실험 진행시, 12개의 하이드로폰이 서로 다른 감도 특성을 가지는 것을 확인하였고, 이로 인해 빔포밍을 통한 신호 합성시 각 하이드로폰에 수신된 신호가 거처온 환경에 따라 임펄스 잡음 등이 섞이는 경우가 발생하기 때문으로 보여진다. omni 분석 결과와 각 하이드로폰 개수에 따른 성능 차이 분석 결과에서, 하이드로폰 하나에 대한 EVM 및 coded BER 성능증가 기대치 분석 결과를 그림 17에 나타내었다.

그림 17의 (a)에서, 하이드로폰의 개수가 3일 경우 단일 하이드로폰의 EVM 성능증가 기대치는 -2.7376dB이며, 4개일 경우 -2.0186dB, 6개일 경우 -1.3565dB, 12개일 경우 -0.777dB로 나타났다. 그리고 그림 17의 (b)의 결과에서, 하이드로폰의 개수가 3일 경우 단일 하이드로폰의 BER 성능증가 기대치는 0.008, 4일 경우 0.0043, 6일 경우 0.0035, 12일 경우 0.0011로 나타났다. 분석 결과와 같이, 하이드로폰 개수가 증가할수록 단일 하이드로폰에 대한 MMSE 빔포밍의 EVM 및 coded BER 성능증가 기대치가 2차 함수 형태로 줄어드는 것이 확인되었다.

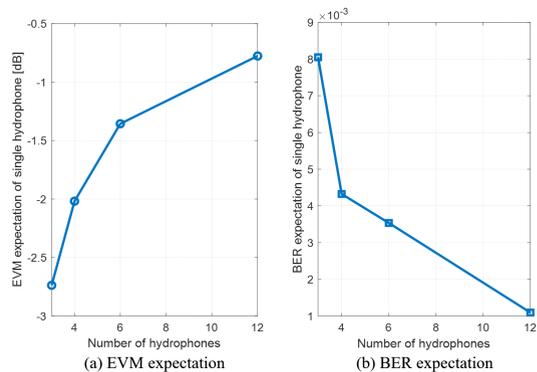


그림 17. 단일 하이드로폰 대한 EVM, BER 성능증가 기대치
Fig. 17. EVM and BER expectation of single hydrophone

VI. 결 론

본 논문에서는 MMSE 빔포밍이 적용된 수중 OFDM 시스템에서 등간격 원형 배열되는 하이드로폰의 개수에 따른 성능분석 연구를 수행하였다. 32kHz 대역에서 4kHz대역폭을 갖는 OFDM 시스템에서 하이드로폰이 3개, 4개, 6개, 12개일때의 MMSE 빔포밍 성능을 비교 분석하였다. 비교를 위해 실험실 실험을 진행하였으며, 저장된 데이터의 EVM과 BER을 분석한 결과, 평균 EVM 수치는 omni대비 각각 7.4283dB, 7.2899dB, 7.3543dB, 8.5392dB 성능증가를 보였으며, 평균 coded BER 수치는 omni 대비 각각 0.0175, 0.0244, 0.0205, 0.0285 감소하여 성능증가 효과를 보였다. 이러한 결과를 바탕으로, 서로다른 하이드로폰 개수를 사용하는 MMSE 빔포밍 수신기에서 단일 하이드로폰의 EVM, BER 성능증가 기대치를 분석한 결과, 하이드로폰의 개수가 많아질수록 단일 하이드로폰의 성능 증가 기대치는 2차함수 형태로 감소하는 것을 확인하였다. 본 논문의 결과를 통해, 수중 OFDM 시스템에서 등간격 원형 배열 하이드로폰을 사용하는 MMSE 빔포밍 수신기를 설계시 배열 소자의 개수를 효율적으로 결정하는데 도움이 될 것으로 보여진다.

References

[1] C. He, K. Cheng, Q. Li, W. Shi, and Q. Zhan, "Beam diversity for single-carrier block transmission underwater acoustic communications," *2016 IEEE ICSPCC*, Hong Kong, Aug. 2016.

[2] J. Li, J. Wang, X. Wang, G. Qiao, H. Luo, and T. Aaron Gulliver, "Optimal beamforming design for underwater acoustic communication with multiple unsteady sub-gaussian interferers," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 12, pp. 12381-12386, Dec. 2019.

[3] W. Yuan, T. Zhou, S. Jiajun, W. Du, B. Wei, and T. Wang, "Correction method for magnitude and phase variations in acoustic arrays based on focused beamforming," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 9, pp. 6058-6069, Sep. 2020.

[4] T. Ishikawa and S. Yoshizawa, "RAKE reception of OFDM signals in non-line-of-sight underwater acoustic communication,"

2021 ISPACKS, pp. 1-2, Nov. 2021.

- [5] J. V. O. Goncalves and G. L. Siqueira, "Delay spread calculation from coherence bandwidth measurements on a ofdm based mobile communications system," *2009 SBMO/IEEE MTT-S IMOC*, pp. 253-256, Nov. 2009.
- [6] T. H. Im and H. L. Ko, "physical layer technologies in underwater acoustic communications," *KICS Inf. and Commun. Mag.*, vol. 33, no. 8, pp. 63-70, Jul. 2016.
- [7] Y. S. Cho, J. K. Kim and W. Y. Yang, "MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB," HONGREUNG PUBLISHING COMPANY, 2008.
- [8] A. Hueber, K. S. Zigangirov, and D. J. Costello, Jr., "Laminated turbo codes : A new class of block-convolutional codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, pp. 3024-3034, Jun. 2008.
- [9] Y.-H. Cho, T.-S. Lee, and H. R. Go, "Performance analysis of ofdm-based underwater communication systems for time-varying underwater channel in western sea of Korea," *J. KICS*, vol. 43, no. 10, pp. 1654-1663, 2018.
- [10] H. Cox, R. Zeskind, and M. Owen, "Robust adaptive beamforming," *IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Process.*, vol. ASSP-35, no. 10, pp. 1365-1376, Oct. 1987.
- [11] L. C. Godara, "Prolog to applications of antenna arrays to mobile communications, Part I: Performance improvement, feasibility, and system consideration," in *Proc. IEEE*, vol. 85, pp. 1029-1060, Jul. 1997.
- [12] J. Lei, D. Gang, and Z. Ping, "EVM measurement algorithm for FODM transmitters," *2006 Int. Symp. Commun. and Inf. Technol.*, pp. 102-107, Oct. 2006.

김 준 호 (Jun-Ho Kim)

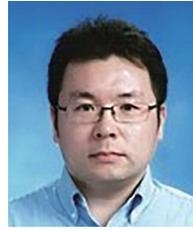


2014년 : 호서대학교 정보통신
공학부 학사
2016년 : 호서대학교 정보통신
공학부 석사
2021년 : 호서대학교 정보통신
공학과 공학박사
2022년~현재 : LIG Nex1 해양

연구소 해양기술개발단, 1팀 선임연구원
<관심분야> 수중통신, 이동통신, 배열신호처리, 스
마트 안테나, 빔포밍

[ORCID:0000-0001-7481-2181]

임 태 호 (Tae-Ho Im)

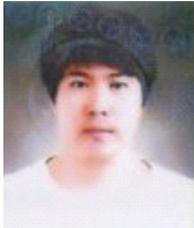


2006년 : 중앙대학교 전자전기
공학부 학사
2008년 : 중앙대학교 전자전기
공학부 석사
2012년 : 중앙대학교 전자전기
공학부 박사
2012년~2015년 : 삼성전자 DMC
연구소책임연구원

2015년~현재 : 호서대학교 해양IT융합기술연구소 부
교수

<관심분야> 이동통신, IoT 통신, 수중통신, 해양통신
[ORCID:0000-0003-1232-7409]

차 민 혁 (Min-Hyuk Cha)



2012년 : 호서대학교 정보통신
공학부 학사
2014년 : 호서대학교 정보통신
공학부 석사
2014년~2016년 : 선박해양플랜
트연구소 연구원
2016년~현재 : 호서대학교 해양
IT융합기술연구소 연구원

<관심분야> 수중통신, 이동통신, 배열신호처리

[ORCID:0000-0003-2075-1031]

고 학 림 (Hak-Lim Ko)



1983년 : 숭실대학교 전자공학
과 졸업
1986년 : Fairleigh Dickins on
Univ. 전기 및 컴퓨터 공학
과 석사
1995년 : North Carolina state
Univ. 전기 및 컴퓨터 공학
과 박사

1996년~현재 : 호서대학교 정보통신 공학과 교수

<관심분야> 스마트 안테나 시스템, 이동통신, 수중
통신, 해양통신

[ORCID:0000-0003-4811-1116]

왕 비 (Fei Wang)



2019년 : 호서대학교 정보통신
공학부 학사
2021년 : 호서대학교 정보통신
공학부 해양융합기술학과 석
사
<관심분야> 수중통신, 이동통
신, 배열신호처리

[ORCID:0000-0001-5821-9695]