

# 송·수신기 하드웨어 손상에 강인한 하향링크 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 테스트베드: 시스템 설계 및 실험 결과

김선민\*, 성재협\*, 박주하\*\*, 함형빈\*\*, 신원재°

## Acoustic Communication Testbed for Downlink NOMA Transmission with Transceiver Hardware Impairments : System Design and Experimental Results

Seonmin Kim\*, Jaehyup Seong\*, Juha Park\*\*, Hyeongbeen Ham\*\*, Wonjae Shin°

### 요약

음파통신은 스피커와 마이크와 같은 간단한 송·수신 장치만으로 통신이 가능하여, 스마트폰 등 여러 매체를 활용한 근거리 통신기술로 많이 활용되고 있다. 최근, 다양한 분야에서 음파통신 시스템의 수요 증가와 함께 통신을 수행해야 하는 단말의 개수가 기하급수적으로 늘어나고 있다. 이러한 배경에서 다수의 사용자에게 직교 다중접속 기술(Orthogonal Multiple Access, OMA)을 사용할 경우 자원을 나눠 할당하는 것에 대한 한계가 있어 자원 효율성에 대한 문제가 발생한다. 이를 극복하기 위해 높은 자원 효율성을 기반으로 다수의 사용자에게 저 지연 서비스를 제공할 수 있는 비-직교 다중접속기술(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)을 음파통신 시스템에 접목하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있지만, 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 테스트베드 사례는 제시되지 않았다. 본 논문에서는 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템 모델을 제안하고 구축한 테스트베드 환경에서 발생하는 가청주파수 잡음과 하드웨어 손상을 분석한 뒤, 개선하여 자원 효율적인 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템을 구현한다. 최종적으로 구현한 기술이 직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템보다 자원 효율성 및 신뢰성 측면에서 우수한 성능을 보임을 검증한다.

**Key Words** : Acoustic communication, OFDM, NOMA, Audio frequency noise, Hardware impairments

### ABSTRACT

Acoustic communication has been widely used in short-range communication technologies, such as smartphones, due to its simplicity in using transmitting and receiving devices like speakers and microphones. In recent years, the number of terminals that need to perform communication has increased dramatically along with the increase in demand for acoustic communication systems in various fields. Against this background,

\* 본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2022R1A2C4002065, No. 2021R1A4A1030775)과 정보통신기획평가원(No. 2023-2018-0-01424)의 지원으로 연구되었음.

• First Author : Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, ksm990323@ajou.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, wjshin@ajou.ac.kr, 중신회원

\* Ajou University Department of Artificial Intelligence Convergence Network, john12234@ajou.ac.kr, 학생회원

\*\* Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, {qkrwngk8471, andco2009}@ajou.ac.kr, 학생회원

논문번호 202303-045-A-RU, Received March 9, 2023; Revised April 14, 2023; Accepted April 17, 2023

when using Orthogonal Multiple Access (OMA) for multiple users, there is a fundamental limit to dividing and allocating resource, which leads to resource efficiency problems. To overcome this problems, extensive research have been conducted to apply Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), which provides high resource efficiency and low latency service to multiple users, to acoustic communication system. However, to the best of our knowledge, there is no prior work on testbed for NOMA-based acoustic communication systems. In this paper, we put forth NOMA-based acoustic communication system model and implement a resource efficient NOMA-based acoustic communication system by analyzing audible frequency noise and hardware impairments that occur in the testbed environment. Finally, we verify that the implemented technology performs better in terms of resource efficiency and reliability than the OMA-based acoustic communication system.

### I. 서론

음파통신은 스피커와 마이크와 같은 간단한 송·수신 장치만으로 통신이 가능하며, 스마트폰 등 여러 매체를 활용한 근거리 통신기술로 활용되고 있다<sup>[1]</sup>. 예시로 매장 내 스피커를 활용하여 각 고객의 스마트폰 위치를 확인한 뒤 서비스를 제공하거나, 케이팝(K-pop) 공연에서 고성능 마이크 센서를 통해 저전력으로 미디어 콘텐츠에 맞춰 실시간으로 빛을 내고, 진동할 수 있는 스마트 응원도구를 들 수 있다. 최근에는 카메라로 비행 중인 드론의 부품 상태를 점검하기 어려운 문제를 해결하기 위해 드론이 내는 음향 기반의 신호를 분석함으로써 드론을 감지하거나, 드론의 고장을 파악하는 것에도 음파통신을 활용하고 있다<sup>[2]</sup>. 즉, 다양한 분야에서 음파통신을 이용한 시스템의 수요 증가와 함께 통신을 수행해야 하는 단말의 개수가 기하급수적으로 늘어나고 있다.

이러한 배경에서 다수의 사용자를 지원하는 음파통신 시스템을 설계할 때 그림 1과 같이 직교 다중접속기술(Orthogonal Multiple Access, OMA)을 사용할 경우 자원을 나눠 할당하는 것의 한계가 있어 자원 효율성에

대한 문제가 발생하거나 시간적인 측면에서 저 지연 서비스를 제공하기 어려울 수 있다. 반면 비-직교 다중접속기술(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)의 경우 높은 자원의 효율성을 기반으로 다수의 사용자에게 동시에 서비스를 제공할 수 있다.

비-직교 다중접속기술은 모든 자원을 공유하고, 중첩된 신호를 전송하여 높은 자원의 효율성과 고속의 데이터 전송속도를 얻을 수 있어 5G 서비스 종류 중 하나인 Ultra-Reliable and Low Latency Communication (URLLC)의 요구사항을 달성하기 위한 기술로 제안되었다<sup>[3-5]</sup>. 이런 이점 때문에 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project(3GPP)에서도 비-직교 다중접속기술을 차세대 통신에 적용할 수 있는 유망한 기술로 고려하고 있다<sup>[6]</sup>.

최근, 비-직교 다중접속기술을 대규모 단말이 존재하는 음파통신에 접목하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. [7]에서는 비-직교 다중접속기술을 적용하여 수중 센서 네트워크를 효율적으로 운영하는 연구를 수행하였다. [8]에서는 수중에서 무인 잠수함 시스템에 비-직교 다중접속기술과 신호를 송신하는 기법으로 Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM)과 Filterbank multicarrier(FBMC)를 사용하였을 때 각각의 성능을 비교하였다. 이처럼 비-직교 다중접속기술을 수중 환경에서 음파통신에 적용하기 위한 연구를 수행하고 있는 사례는 많이 존재하지만, 비-직교 다중접속기술을 대기 환경에서 음파통신에 접목하기 위한 연구를 수행한 사례는 제시되지 않았다. 더불어 비-직교 다중접속기술을 음파통신에 접목한 테스트베드 설계가 이루어진 사례 또한 아직 제시되지 않았다.

실제 환경에서 비-직교 다중접속기술을 음파통신에 효과적으로 적용하기 위해서는 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 테스트베드 연구가 필요하다. 그러므로 본 논문에서는 개인 노트북을 활용하여 대기 환경에서 테스트베드를 구축하고, 비-직교 다중접속기술 기반 음

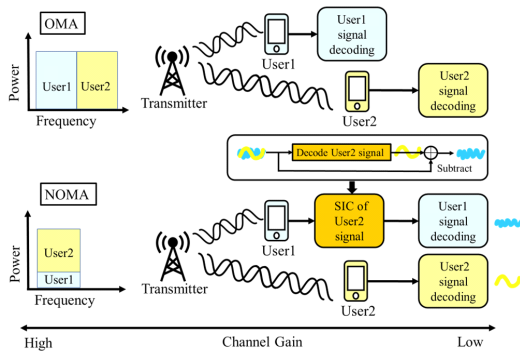


그림 1. 하향링크에서 직교 다중접속기술과 비-직교 다중접속기술의 동작도

Fig. 1. Operation of OMA and NOMA on downlink

과통신 시스템의 성능을 분석한다. 이를 구현하기 위해 테스트베드 구축환경에서 주로 발생하는 환경잡음의 성질을 분석하여 잡음이 발생하지 않는 주파수 대역에서 신호를 전송한다. 변조 과정에서 OFDM을 사용하여 발생하는 Peak-to-Average ratio(PAPR) 문제의 경우 구축한 테스트베드 환경에서 하드웨어 손상분석을 통하여 개선한다.

본 논문의 세부 구성은 다음과 같다. II장에서는 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템의 테스트베드 개요를 설명한다. III장에서는 구축한 테스트베드 환경에서 발생하는 잡음 성질과 하드웨어 손상을 분석한 뒤 이를 개선한다. IV장에서는 III장에서 분석하여 얻은 최적의 파라미터 값들을 토대로 테스트베드 환경에서 구현한 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템과 직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템에 대해 성능 분석을 수행한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

## II. 테스트베드 개요

본 논문에서 구축한 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템 모델은 그림 2와 같다. 송신하고자 하는 정보를 음파 신호로 변환하여 송신단의 스피커를 통해 전송하고 수신단에서 마이크와 같은 음성장치로 음파 신호를 수신하여, 전송된 데이터로 다시 변환한다. 정보에 해당하는 이미지를 처리하기 위해 MATLAB Image Processing Toolbox를 활용하였고, 정보를 스피커를 통해 음파로 전송하고 마이크를 입력받기 위해 MATLAB Audio Toolbox를 활용하였다. 테스트베드를 구축하는데 사용한 장치와 정보를 생성하고 복원하는 구체적인 과정은 다음과 같다.

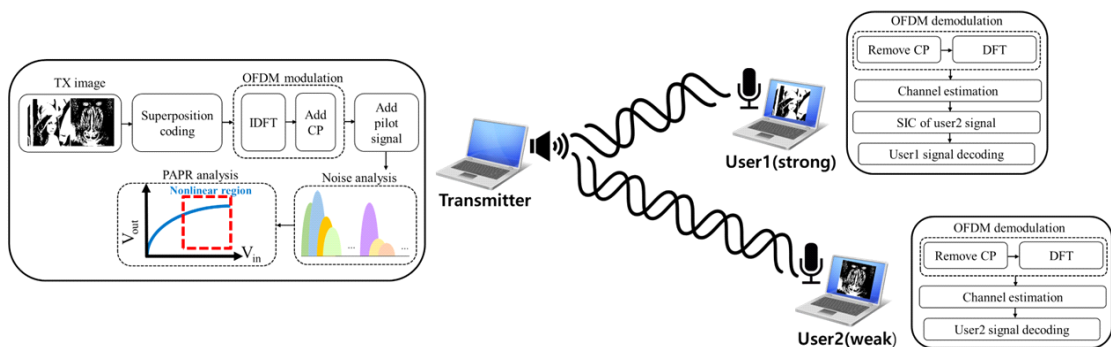


그림 2. 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템 모델  
Fig. 2. NOMA based on acoustic communication system model

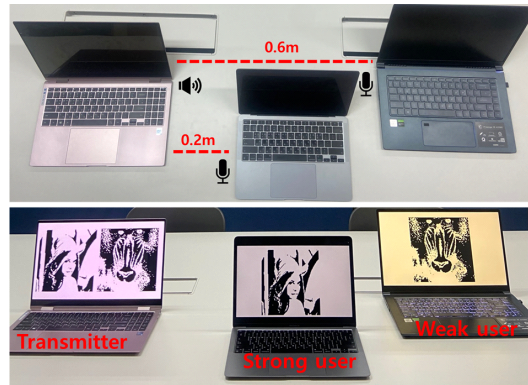


그림 3. 음파통신 테스트베드 송신단 및 수신단  
Fig. 3. Transmitter and receiver of acoustic communication testbed

### 2.1 송신단 및 수신단 구성

이주대학교에 소재한 건물 안에서 노트북 3대를 그림 3과 같이 배치하였다. 거리의 경우 송신단의 오른쪽 끝을 기점으로 각 수신단의 왼쪽 끝에 해당하는 거리에 대해 측정한다. 송신단으로부터 0.2, 0.6 m 떨어진 지점에 각 수신단을 배치한다. 송·수신장치로 사용한 노트북 3대의 제품은 표 1과 같다.

### 2.2 비-직교 다중접속기술

고려하는 음파통신 시스템 모델에서는 비-직교 다중접속기술을 사용하기 때문에 송신단에서 정보를 중첩 코딩하여 신호를 전송하고 채널 조건이 좋은 강한 사용자(Strong user)에 해당하는 수신단이 채널 조건이 약한 사용자(Weak user)의 신호를 순차적 간섭제거기법(Successive Interference Cancellation, SIC)을 수행한다는 특징이 있다.

본 논문에서 사용한 SIC는 The Fixed-Sequence SIC(F-SIC)로 중첩된 신호에 대해서 복조 순서를 미리

표 1. 사용한 송신단 및 수신단 제품  
Table 1. Products of using transmitter and receiver

송신기 (Transmitter)		
제조사	모델명	스피커
삼성전자	NT950QDB-K71AG	AKG 스테레오 스피커 (1.5 W×2)
약한 사용자 (Strong user)		
제조사	모델명	마이크
Apple	2020 M1 Macbook air	3 마이크 어레이
강한 사용자 (Weak user)		
제조사	모델명	마이크
MSI	MSI Prestige 15 A10SC	3.3 V 디지털 마이크

결정하여 SIC를 수행하는 방법이다. 일반적으로 수신단에서 이를 수행하기 위해 수신 신호에서 전력 세기가 강한 사용자의 신호를 먼저 복조한 뒤, 재변조하여 전체 신호에서 이를 제거하여 본인의 신호를 추출한다<sup>9)</sup>. F-SIC는 중첩된 신호에 대해서 복조 순서가 미리 결정되고 고정되어 있어 수신단의 복잡도가 낮아지고 구현이 쉽다는 장점이 있다.

이러한 배경에서 구축한 테스트베드 환경에서는 가까운 거리에 위치한 수신단이 강한 사용자, 먼 거리에 위치한 수신단을 약한 사용자로 가정한다. 송신단에서 변조를 수행한 강한 사용자의 신호  $x_1$ 과 약한 사용자의 신호  $x_2$ 에 전력 할당을 다르게하여 중첩코딩된 신호는 식 (1)과 같다.

$$x = \sqrt{\alpha P_t} x_1 + \sqrt{(1-\alpha) P_t} x_2, \quad (1)$$

$$y_i = h_i x + n_i. \quad (2)$$

$P_t$ 는 송신단의 전력을 뜻하고,  $\alpha$ 는 전력 할당 상수를 의미한다. 또한,  $i$ 번째 사용자가 수신받는 신호는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $h_i, n_i$ 은  $i$ 번째 사용자의 채널과 잡음을 의미한다. 본 논문에서는 강한 사용자가 약한 사용자보다 채널 조건이 좋다고 가정하여  $|h_1|^2 > |h_2|^2 > 0$ 의 순차적 크기로 가정한다. 강한 사용자의 경우 수신한 신호에서 파일럿 신호를 이용한

채널 추정을 통해  $\frac{y_1}{h_1} = \hat{x}$ 에 해당하는 신호를 얻는다.

$\hat{x}$  신호에서 SIC를 수행하기 위해 강한 사용자가 중첩된 신호에서 수신된 전력이 더 큰 사용자의 신호를 먼저 복조 하는 과정을 거친다.  $\hat{x}$  신호를 복조하고 난 뒤 재변조하는 경우  $\check{x}_2$ 로 표현할 수 있다. 재변조한  $\check{x}_2$  신호에서  $\sqrt{(1-\alpha)}$ 을 곱한 뒤  $\hat{x}$ 에서 이를 제거한다. 이 과정을 통해 강한 사용자가 최종적으로 얻는 신호  $\hat{x}_1$ 는 식 (3)에 해당한다. 이후 강한 사용자는  $\hat{x}_1$  신호를 복조하여 본인의 정보를 얻는다.

$$\hat{x}_1 = \hat{x} - \sqrt{(1-\alpha)} \check{x}_2. \quad (3)$$

이 과정에서 환경요소에 의한 잡음이 발생하게 되면 강한 사용자가 약한 사용자의 신호를 SIC를 수행하는 과정에서 사용자 간의 간섭제거가 완전히 이루어지지 않는 문제가 발생한다<sup>10)</sup>. 그러므로 환경요소에 의한 잡음을 고려하여 신호를 송신한 뒤 강한 사용자가 약한 사용자의 신호를 성공적으로 SIC를 수행하여, 본인의 신호를 오류 없이 복조하는 것이 중요하다. 약한 사용자의 경우 채널 조건이 강한 사용자보다 좋지 않기 때문에 SIC를 수행하지 않고, 수신받은 신호에서 강한 사용자의 신호를 간섭으로 취급하여 자신의 신호를 복조하고, 최종적으로 수신하고자 하는 정보를 얻는다.

### 2.3 전력 할당 비율

송신단에서 변조 방식에 따라 각 사용자의 정보를 중첩하여 신호를 송신할 때, 각 수신단에서는 송신전력에 따라 다른 성상도를 얻는다. 그러므로 시스템 성능 향상을 위해 송신단은 변조 방식에 따라 적절한 전력 할당

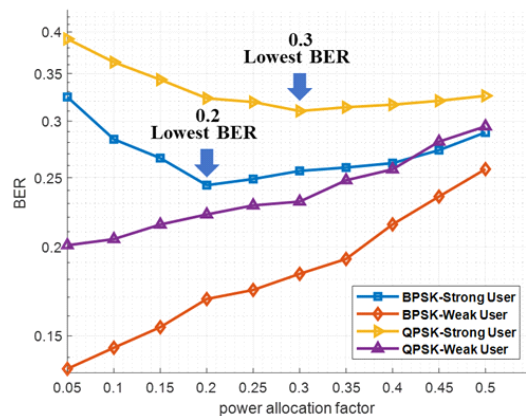


그림 4. 전력 할당 상수에 따른 사용자의 BER  
Fig. 4. BER of user according to the power allocation factor

비율을 결정하여 신호를 송신하는 것이 중요하다<sup>[11]</sup>. 구축한 테스트베드에서 최적의 전력 할당 비율을 결정하기 위해 [11]을 참고하여 변조 방식에 따라  $\alpha$ 에 해당하는 전력 할당 상수를 증가시켜 신호를 송신했을 때 각 수신단에서 복조한 신호의 비트 오류율(Bit Error Rate, BER)을 분석한다. 실험 결과 BPSK, QPSK 변조 방식 모두 전력 할당 상수가 증가함에 따라 채널 조건이 좋지 않은 약한 사용자의 BER이 증가함을 보인다. 강한 사용자의 경우 전력 할당 상수가 증가함에 따라 BER이 낮아진다 다시 증가하는 개형을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 각 변조 방식에 대해서 강한 사용자의 BER이 제일 낮은 값을 갖는 값을 전력 할당 상수로 결정한다. 그러므로 본 논문에서는 전력 할당 상수를 BPSK 변조의 경우 0.2, QPSK 변조의 경우 0.3의 값으로 결정한다.

### 2.4 OFDM

OFDM은 높은 주파수 효율성을 기반으로 다수의 직교 부반송파를 전송하여 고속의 데이터 전송률을 지원하고 다중경로 페이딩에 강인한 장점이 있다. 본 논문에서 구현하는 송신장치에서는 중첩된 정보를 OFDM 변조를 거쳐 시간 영역에서 신호를 송신한다. OFDM을 통해 데이터를 송신하는 과정에서 식 (4)과 같이 Inverse Discrete Fourier Transform(IDFT)를 사용하고 독립적으로 변조된  $N$ 개의 부반송파를 시간 영역으로 변환하여 신호를 송신한다. 이때,  $x[n]$ 의 전력은 부반송파 진폭의 합에 영향을 받고, 특정  $x[n]$ 의 전력이 식 (5)와 같이 평균전력보다 일정값 이상으로 커질 경우, PAPR 값이 커진다.

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad (4)$$

$$PAPR = \frac{\max_{0 \leq n \leq N-1} |x[n]|^2}{E[|x[n]|^2]}. \quad (5)$$

PAPR은 OFDM 시간 영역 신호에 대해서 최대전력과 평균전력의 비율을 의미한다. PAPR이 커지게 되면 송신부에서 증폭기의 선형성을 잃어 출력신호 간의 왜곡을 발생시키고 OFDM 심볼 내 BER의 열화를 야기한다<sup>[12]</sup>. 이 문제를 구축한 테스트베드 환경에서는 하드웨어 손상을 개선하여 BER의 열화를 방지한다.

### 2.5 채널추정

무선통신 환경에서 정보를 송신할 때 발생하는 다중경로 페이딩으로 인해 수신단에서는 본래 보낸 신호와

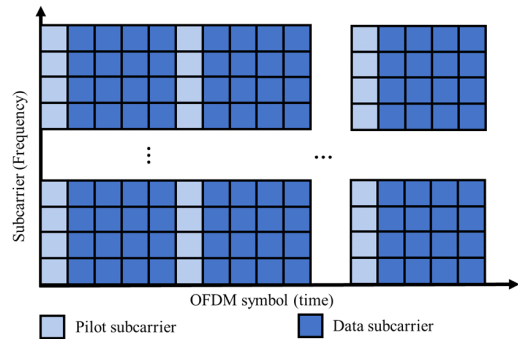


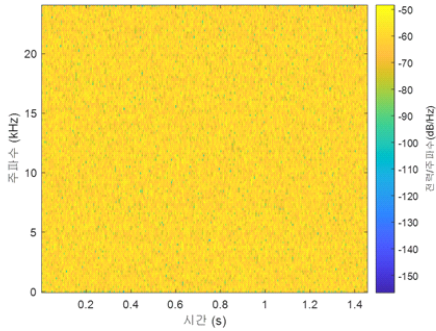
그림 5. OFDM 블록에서 파일럿 신호 삽입  
Fig. 5. Pilot insertion for OFDM block

달리 왜곡된 정보를 받는다. 신호의 왜곡을 추정하여 보상하기 위해 송·수신단이 사전에 알고 있는 파일럿 신호를 주기적으로 전송하여 채널을 추정한다. 본 논문에서 사용한 파일럿 신호의 구조는 그림 5와 같다. 처음 시간 영역에서 256개의 해당하는 모든 부반송파와 Cyclic Prefix(CP) 32개에 대해서 채널 추정을 위한 정보를 전송하고 실제 정보를 담고 있는 OFDM 블록을 4번 전송한다. 이후 다시 채널 추정을 위해 파일럿 신호를 모든 부반송파에 실어 전송하고 실제 정보를 담고 있는 OFDM 블록을 4번 전송하는 과정을 반복한다. 수신단에서는 신호의 OFDM 블록안에 있는 파일럿 신호를 통해 시계 정보를 담고 있는 OFDM 블록의 정보를 추정한다.

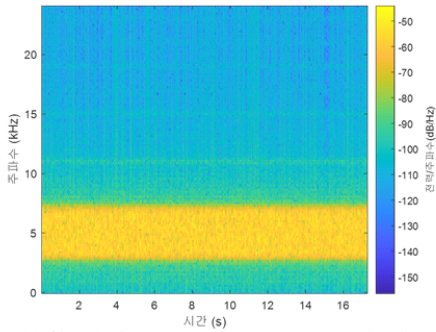
### 2.6 sample rate 동기화

고려하는 시스템 모델에서는, 노트북을 활용하여 사용자의 신호를 전송하고 수신할 때 MATLAB Audio Toolbox를 사용하였다. 신호를 송·수신하는 과정에서 sample rate의 경우 송·수신기 하드웨어가 공통으로 지원하는 sample rate를 고려하여 송·수신기의 sample rate를 48000 Hz로 설정한다. 이 때문에 OFDM 기반 시스템에서 대역폭에 따른 sample rate와 OFDM 신호를 전송하기 위해 설정한 송·수신기의 sample rate에 해당하는 48000 Hz와 동기화가 이루어지지 않으면 변조가 제대로 수행되지 않는 문제가 발생한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 OFDM 변조된 신호를 하나의 이산신호라고 생각하고 up sampling 한 뒤, up sampling 한 이산신호를 디지털 보간 필터를 이용하여 연속 신호로 만든 뒤 48000 Hz에 해당하는 sample rate로 신호를 송신한다. 수신단에서는 48000 Hz에 해당하는 sample rate로 수신받은 뒤, down sampling을 통하여 본래 OFDM 변조된 신호의 sample rate를 얻는다.



a) Signal before the sample rate synchronization



b) Signal after the sample rate synchronization

그림 6. OFDM 변조 신호의 spectrogram 분석 a) sample rate 동기화 전, b) sample rate 동기화 후  
Fig. 6. Analysis spectrogram of OFDM modulation signal a) before the sample rate synchronization, b) after the sample rate synchronization

실제로 동기화를 하기 전후의 주파수 성분을 분석하기 위해 MATLAB 함수로 수신한 신호의 각 주파수에 따른 전력 밀도를 나타내는 spectrogram을 사용한다.

그림 6은 sample rate를 동기화하지 않았을 때와 동기화를 수행했을 때 신호의 spectrogram을 나타낸다. 두 가지 경우를 통해 sample rate 동기화를 수행한 경우 OFDM 신호의 변조가 잘 이루어지는 것을 알 수 있다. 하지만 OFDM 시스템의 대역폭을 좁게 할수록 sample rate를 동기화하는 과정에서 변조된 신호를 up sampling 하는 횟수가 증가하기 때문에 데이터 전송률 측면에서 성능의 열화가 발생한다는 문제점이 있다. 본 논문에서 구축한 테스트베드의 경우 BPSK 변조 방식의 경우 4.5 Kbps, QPSK 변조 방식의 경우 9 Kbps를 목표 데이터 전송률로 설정하여 대역폭을 9600 Hz로 설정한다.

### 2.7 시간 동기화

시간 동기화는 송·수신기 간 데이터를 주고받는 시점을 정확하게 일치시키는 것이다. 무선통신을 수행할 때 동기화를 하지 않으면 모든 데이터를 수신할 수 없

나, 불필요한 데이터를 수신하게 된다는 문제점이 발생한다. 그러므로 신뢰성 있는 통신을 구축하기 위해서 시점을 일치시킨 뒤 신호를 송·수신해야 한다.

구축한 테스트베드 환경에서는 preamble 신호로 Chip-Spread-Spectrum(CSS)을 사용하여 시간 동기화를 수행한다. CSS는 시간에 따라 사용하는 대역폭 내에 주파수가 선형적으로 증가 또는 감소하는 특징이 있다 [13]. 할당된 대역폭을 전부 사용하기 때문에 채널 노이즈 및 다중경로 페이딩에 강인하다.

### 2.8 채널 분석

OFDM을 사용하는 시스템 특성상 채널 환경에서 발생하는 delay spread에 따라 CP, 부반송파의 개수를 고려해야 한다. 구축한 테스트베드 환경의 채널을 파악하기 위해 impulse function에 해당하는 송신 신호에 대해서 강한 사용자를 기준으로 Power Delay Profile(PDP)를 분석한다.

그림 7을 통해 얻은 PDP에서 delay spread를 분석하기 위해 대기 환경에서 음파통신을 수행하여 제일 큰 전력 신호에 대해 상대전력인 -6 dB에 해당하는 임계값을 기준으로 delay spread를 분석한 [14] 논문을 참고한다. [14]를 참고하여 테스트베드 환경에서 Root Mean Square(RMS) delay spread를 분석한 결과 0.2834 ms에 해당하는 값을 얻을 수 있었다. 본 논문에서는 9600 Hz에 해당하는 대역폭을 사용하기 때문에 이를 부반송파 개수로 나눴을 때 상관 대역폭에 해당하는 3528.58 Hz보다 낮은 값이어야 Inter Symbol Interference(ISI)에 강인한 통신을 수행할 수 있다. 그러므로 이를 고려하여 음파통신을 수행하는 환경에서 부반송파의 개수를 256개로 설정한다. CP의 경우 32개를 설정하였다. 그러므로 구축한 테스트베드 환경에서

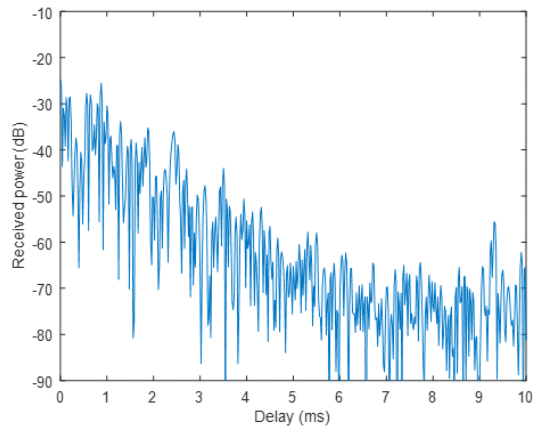


그림 7. 강한 사용자의 power delay profile  
Fig. 7. Power delay profile of strong user

는 OFDM 블록하나에 256개의 부반송파와 32개의 CP 로 구성한다.

### III. 환경잡음 및 하드웨어 손상개선

본 장에서는 테스트베드 구축환경에서 환경잡음과 하드웨어 손상문제를 개선하여 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템을 설계하는 과정을 보인다. II장에서 다룬 배경을 바탕으로 설정한 주요 파라미터는 표 2와 같다.

표 2. 실험 변수  
Table 2. Experiment parameters

Parameters	
Modulation	BPSK, QPSK
Channel coding	1/3-repetition
No. of subcarriers	256
No. of cyclic prefix	32
No. of valid OFDM blocks (BPSK, QPSK)	192, 96
No. of OFDM blocks for pilot signal (BPSK, QPSK)	48, 24
Center frequency	5 - 16 KHz
Bandwidth	9600 Hz
User1(strong) distance	0.2 m
User2(weak) distance	0.6 m
Power allocation (from near to far) (BPSK, QPSK)	0.2, 0.8 0.3, 0.7
Transmission power	-4 - 17 dBm

#### 3.1 환경잡음 개선

그림 8은 수원시 이주대학교에 소재한 건물 실내로 테스트베드 구축을 한 장소에 해당한다. 테스트베드를 수행한 장소 환경의 경우 사람의 음성, 컴퓨터, 히터와 같은 전자제품의 음성 및 진동 등 다양한 종류의 소음들이 환경잡음으로 추가된다. 테스트베드 구축환경에서 발생하는 환경잡음이 일어나는 주파수 대역을 분석하기 위해 spectrogram을 사용한다. 그림 9는 송신단에서 신호를 송신하지 않았을 때와 14 KHz에 해당하는 중심 주파수에 실어 신호를 송신했을 때 수신단에서 입력받은 신호의 spectrogram을 나타낸다. 두 경우를 통해 잡음이 주로 저주파수 대역에 분포하는 것을 알 수 있다.

또한, 통신을 수행할 때 실제 잡음이 각 사용자에게



그림 8. 테스트베드 환경  
Fig. 8. Testbed environment

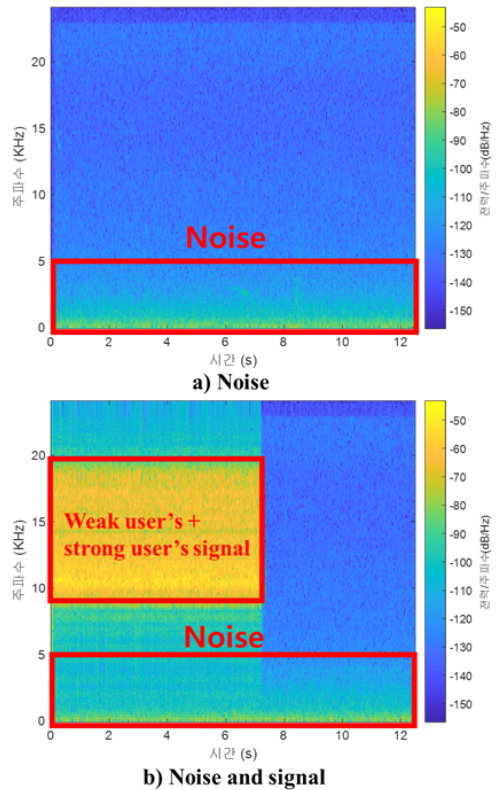


그림 9. 테스트베드 구축환경에서 사용자가 수신한 신호의 spectrogram 분석 a) noise, b) noise and signal  
Fig. 9. Analysis spectrogram of received signal from user in testbed environment a) noise, b) noise and signal

얼마나 큰 신뢰성 저하의 영향을 미치는지 확인하기 위해 잡음의 영향을 가장 많이 받는 주파수 대역에서 신호를 전송했을 때, 중심주파수를 증가시키며 고주파수 대역으로 실어 신호를 전송했을 때 각 사용자의 BER을 분석한다. 이때 신호의 대역폭은 9600 Hz, 송신전력은 17 dBm에 해당한다. BER의 경우 강한 사용자가 SIC를 수행하기 위해서 약한 사용자의 신호를 복조했을 때

BER, 강한 사용자가 SIC를 수행한 뒤 본인의 신호를 복조했을 때 BER, 약한 사용자가 본인의 신호를 복조했을 때 BER을 분석한다.

실험 결과 그림 10을 통해 BPSK, QPSK 변조 방식 모두 중심주파수가 5 KHz일 때 성능이 가장 좋지 않고, 중심주파수가 증가함에 따라 3가지 경우 모두 BER이 낮아지다 14 KHz일 때 최소 BER이 발생하는 결과를 보인다. 이는 테스트베드 환경에서 저주파수 대역에 환경잡음이 주로 존재하여, 고주파수 대역에 신호를 송신하는 것이 통신의 신뢰성을 향상 시킬 수 있기 때문이다.

하지만 BPSK, QPSK 변조 방식 모두 중심주파수가 15, 16 KHz인 경우에 대해서 3가지 경우 모두 BER이 다시 증가하는 개형을 볼 수 있는데, 이는 수신단에 해당하는 노트북 2대 모두 가청주파수 대역을 사용하여 음파통신을 수행하기 때문에 20 KHz에 근접하거나 이를 초과하는 주파수 대역의 신호에 대해서 마이크가 제대로 입력받지 못하여 BER의 열화가 발생한다. 그러므로 본 논문에서 설계한 테스트베드 환경에서는 BPSK,

QPSK 변조 방식 모두 중심주파수를 14 KHz로 결정하여 신호를 송신한다.

### 3.2 하드웨어 손상개선

OFDM을 사용하여 발생하는 PAPR 문제를 개선하기 위해 BER의 열화가 발생하는 지점에 해당하는 송신전력을 찾고 하드웨어의 열화 문제를 개선한다. 이를 위해 송신단의 전력을 -4 dBm에서 3 dB 간격으로 증가시켜 17 dBm 전력까지 신호를 전송한다. 이때 각각 사용자는 수신받은 신호에 대해서 전력 값을 구한다. 송신단에서 전력을 3 dB씩 증가하여 신호를 보냈기 때문에 수신단에서 받은 신호의 전력 값 또한 선형적으로 증가할 것이다.

만일 송신단에서 전력 3 dB를 증가하여 신호를 전송했을 때 수신단에서 받은 신호의 전력 값이 선형적으로 증가하지 않는다면 이는 송신단의 증폭기가 선형성을 잃어 신호 간 왜곡이 발생했음을 의미한다. 추가적으로 송신전력 값에 따른 각 사용자의 BER을 분석한다. 이때 중심주파수는 14 KHz, 대역폭은 9600 Hz에 해당한다.

그림 11은 송신전력에 따른 각 사용자의 수신전력 그래프를, 그림 12는 송신전력에 따른 강한 사용자가 SIC를 수행하기 위해서 약한 사용자의 신호를 복조했을 때 BER, 강한 사용자가 SIC를 수행한 뒤 본인의 신호를 복조했을 때 BER, 약한 사용자가 본인의 신호를 복조했을 때 BER을 나타낸다.

실험 결과 그림 11을 통해 -4 dBm부터 8 dBm까지 BPSK, QPSK 변조 방식 모두 송신전력이 증가함에 따라 사용자의 수신전력 또한 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 반면 11 dBm부터 송신전력이 증가해도 각 사용자의 수신전력이 선형적으로 증가하지 않고 로그 함수

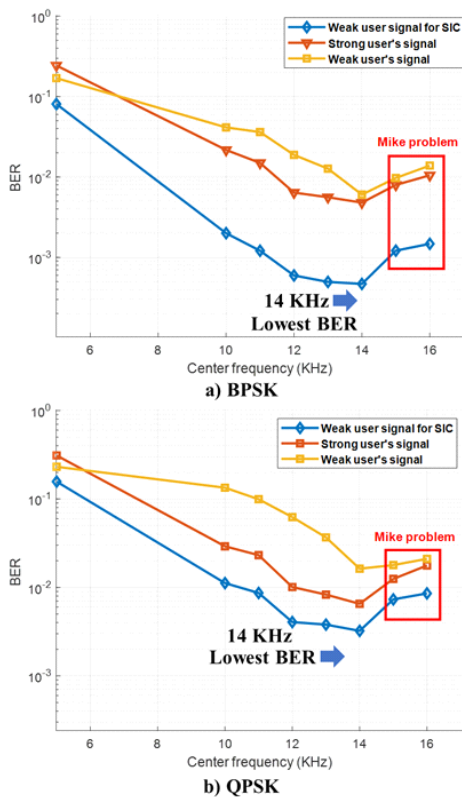


그림 10. 중심주파수에 따른 사용자의 BER a) BPSK, b) QPSK  
Fig. 10. BER of user according to the center frequency a) BPSK, b) QPSK

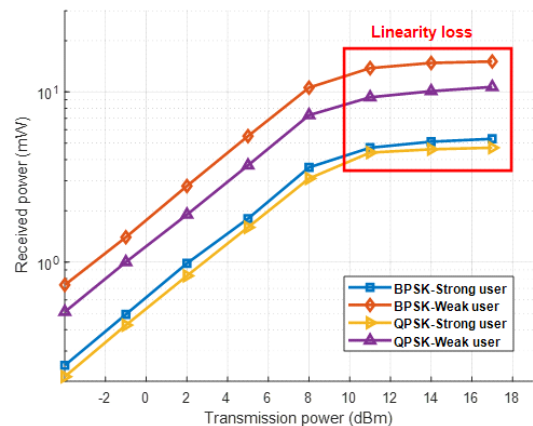


그림 11. 송신전력에 따른 사용자의 수신전력  
Fig. 11. Received power of user according to the transmission power



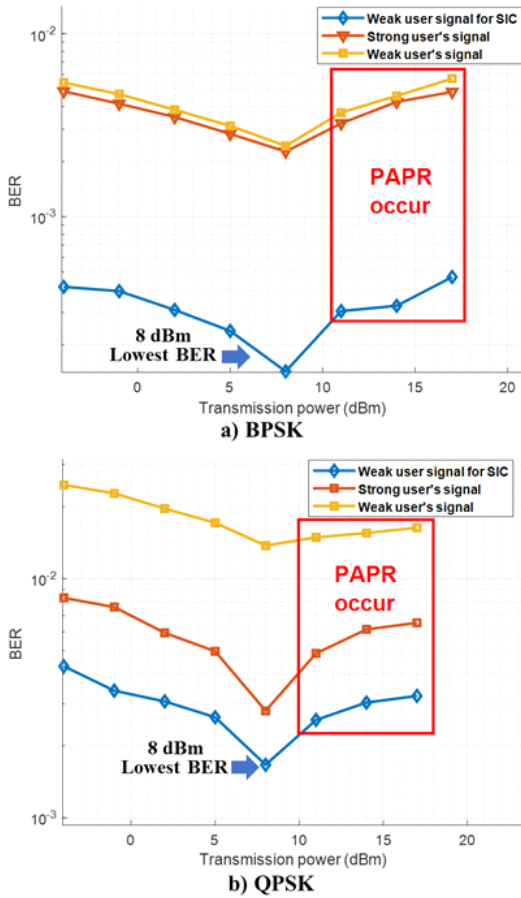


그림 12. 송신전력에 따른 사용자의 BER a) BPSK, b) QPSK  
 Fig. 12. BER of user according to the transmission power a) BPSK, b) QPSK

의 형태로 진행됨을 보이고, 이 결과로부터 11 dBm부터 송신단의 증폭기가 선형성을 잃는다는 것을 알 수 있었다.

그림 12의 경우 -4 dBm부터 8 dBm까지 BPSK, QPSK 변조 방식 모두 송신전력이 증가함에 따라 3가지 경우 모두 BER이 향상됨을 보인다. 반면 11 dBm부터 BPSK, QPSK 변조 방식 모두 3가지 경우에 대해 BER의 열화가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 송신단의 증폭기가 선형성을 잃는 순간부터 신호의 왜곡이 일어나는 것을 분석할 수 있었다. 그러므로 본 논문에서 설계한 테스트베드 환경에서는 송신전력을 8 dBm으로 결정하여 신호를 전송한다.

본 논문에서 구현한 테스트베드 환경에서 PAPR 문제를 개선하기 위해 도출된 최적값 송신전력 8 dBm은 이 환경에서만 적용되는 값이다. 즉, 채널 환경이 급격히 변하거나, 구축하는 송신기 장치에 따라 송신전력에 대해

증폭기가 선형성을 잃는 구간이 다를 수 있다. 즉, 송신장치나 환경에 따라 PAPR 문제를 개선하기 위한 최적의 송신전력 값 또한 변동될 수 있음을 고려해야 한다.

#### IV. 테스트베드 구축을 통한 성능 분석

III장에서 도출한 최적의 파라미터 값을 바탕으로 대기 환경에서 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템을 구현하였다. 구현 과정에서 단계별로 도출한 최적의 파라미터 값에 따른 성능 개선을 확인한다. 이를 위해 환경잡음과 하드웨어 손상문제를 개선하지 않았을 때 사용자의 BER, 환경잡음을 분석하여 개선했을 때 사용자의 BER, 환경잡음과 하드웨어 손상을 모두 개선했을 때 사용자의 BER을 분석한다.

표 3. 제안하는 기술의 BER 성능 비교  
 Table 3. BER performance comparison of the proposed scheme

Not using the proposed scheme			
BPSK		QPSK	
Strong user	Weak user	Strong user	Weak user
BER	BER	BER	BER
$2.44 \times 10^{-1}$	$1.69 \times 10^{-1}$	$3.02 \times 10^{-1}$	$2.36 \times 10^{-1}$
Improvement in audio frequency noise			
BPSK		QPSK	
Strong user	Weak user	Strong user	Weak user
BER	BER	BER	BER
$4.83 \times 10^{-3}$	$5.66 \times 10^{-3}$	$6.53 \times 10^{-3}$	$1.63 \times 10^{-2}$
Improvement in audio frequency noise and hardware impairments			
BPSK		QPSK	
Strong user	Weak user	Strong user	Weak user
BER	BER	BER	BER
$2.26 \times 10^{-3}$	$2.43 \times 10^{-3}$	$2.28 \times 10^{-3}$	$1.35 \times 10^{-2}$

실험 결과는 표 3과 같다. 환경잡음과 하드웨어 손상 문제를 개선하지 않았을 때 BPSK, QPSK 변조 방식 모두 각 사용자의 BER이 모두  $10^{-1}$  수준의 값을 갖는다. 실제로 각 사용자의 이미지는 잡음의 영향을 많이 받고 있다는 사실을 알 수 있다.

환경잡음을 분석하여 개선한 경우 QPSK 변조 방식에서 약한 사용자를 제외하고 BER이 모두  $10^{-3}$  수준의 값을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 각 사용자가 얻은 이미지 또한 상당히 개선되었음을 알 수 있는데 이는 각 사용자가 구축한 테스트베드 환경에서 발생하는 환경잡음의 영향을 거의 받지 않고 있다는 것을 보인다. 환경잡음과 하드웨어 손상을 모두 개선한 경우 또한 QPSK 변조 방식에서 약한 사용자를 제외하고 BER이  $10^{-3}$  수준의 값이지만 이전과 비교했을 때 더 적은 BER이 발생함을 알 수 있다.

다음으로, 테스트베드를 구현하는 과정에서 찾은 최적의 파라미터 값들을 토대로 송신한 신호에 대해 강한 사용자가 수신한 중첩된 신호의 성상도, SIC를 수행한 신호의 성상도를 분석하였다. 그 결과 그림 13과 같은 그림을 확인할 수 있었고, BPSK, QPSK 변조 방식 모두 성공적으로 SIC를 수행함을 확인했다.

또한, 테스트베드 환경에서 동일 전력을 기준으로 구현한 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템과 직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템의 성능을 분석한다. 이때 직교 다중접속기술의 경우 주파수 분할 다중접속기술(Frequency Division Multiple Access, FDMA)을 사용한다. 두 경우 모두 각 사용자의 BER과 데이터 전송률, 주파수 효율성을 비교한다. 직교 다중접속기술의 경우 채널이 좋다고 가정하는 강한 사용자의 중심주파수를 5000 Hz, 채널이 좋지 않다고 가정 한 사

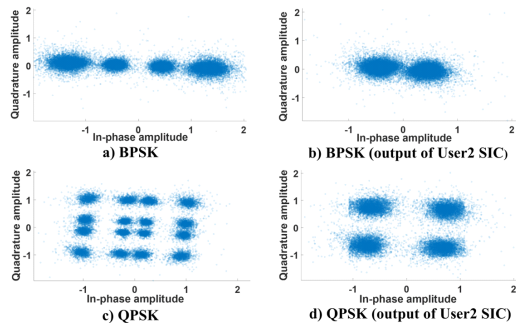


그림 13. 강한 사용자가 수신한 성상도 a) BPSK, b) BPSK, 약한 사용자 신호 SIC, c) QPSK, d) QPSK, 약한 사용자 신호 SIC  
Fig. 13. The received constellation from strong user a) BPSK, b) BPSK, the output of weak user signal SIC, c) QPSK, d) QPSK, the output of week user signal SIC

표 4. 직교 다중접속기술과 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템 성능 비교  
Table 4. Performance comparison of OMA and NOMA based acoustic communication system

OMA			
BPSK		QPSK	
Strong user	Weak user	Strong user	Weak user
BER	BER	BER	BER
$7.53 \times 10^{-2}$	$9.21 \times 10^{-3}$	$1.28 \times 10^{-1}$	$2.06 \times 10^{-2}$
Data rate		Data rate	
4.53 Kbps		9.06 Kbps	
Spectral efficiency		Spectral efficiency	
0.236 bps/Hz		0.472 bps/Hz	
NOMA			
BPSK		QPSK	
Strong user	Weak user	Strong user	Weak user
BER	BER	BER	BER
$2.26 \times 10^{-3}$	$2.43 \times 10^{-3}$	$2.28 \times 10^{-3}$	$1.45 \times 10^{-2}$
Data rate		Data rate	
4.53 Kbps		9.06 Kbps	
Spectral efficiency		Spectral efficiency	
0.472 bps/Hz		0.944 bps/Hz	

용자의 중심주파수는 16 KHz, 대역폭은 9600 Hz를 사용한다.

표 4는 제안하는 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템과 직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템의 성능 표를 나타낸다. BPSK, QPSK 변조 방식 모두 동일한 데이터 전송률 성능을 보이나, BER 성능과 주파수 효율성 측면에서 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템이 우수함을 보인다. 직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템이 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템보다 성능이 좋지 않은 이유는 그림 14를 통해 알 수 있다. 강한 사용자의 경우 잡음이 주로 분포하는 저주파 대역에 신호를 전송하기 때문에 BER의 열화가 발생 할 수 밖에 없고, 약한 사용자의 경우 고주파수 대역에 신호를 전송하여 잡음의 영향을 거의 받지 않지만 그림 14와 같이 고주파수 대역에 존재하는 신호의 전력 밀도가 다른 대역보다 낮은 값을 갖는다. 즉, 수신단의 마이크가 20 KHz에 근접하는 주파수 대역의

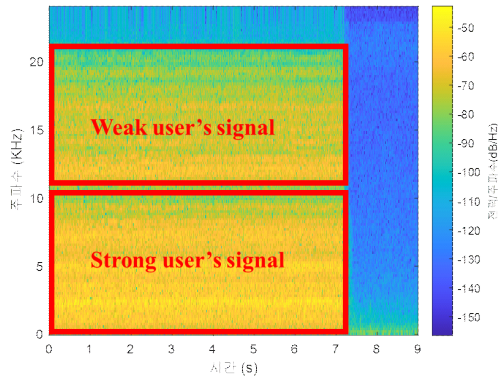


그림 14. 직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템에서 사용자가 수신한 신호의 spectrogram 분석  
Fig. 14. Analysis spectrogram of received signal from user in OMA based acoustic communication system

신호를 원활하게 입력받지 못해 성능의 열화가 발생할 수 있다.

이를 통해 구축한 테스트베드에서 사용한 하드웨어 장치를 사용했을 때, 초음파 대역에 해당하는 주파수 대역에서는 음파통신을 수행하기 어려운 상황이라는 것을 알 수 있다. 즉, 가청주파수 대역만을 사용하여 음파통신을 수행해야 하는 상황이다. 이러한 한정적인 상황에서 비-직교 다중접속기술을 사용할 경우 사용자에게 자원을 효율적으로 이용하여 신뢰성 있는 서비스를 제공할 수 있다.

마지막으로 테스트베드 구축환경에서 인위적으로 잡음을 추가하였을 때 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템과 직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템의 성능 비교를 수행한다. 인위적으로 잡음을 추가하기 위해 그림 15와 같이 송신단 옆에 스마트폰을 두고 음악을 재생한 채로 통신을 수행한다. 또한, 인위적으로 추가한 잡음의 주파수 대역을 분석하기 위해 spectrogram을 사용한다. 그림 16은 인위적으로 추가한 잡음 신호를 수신한 사용자의 spectrogram을 나타낸다. 그림을 통해 추가한 음악 잡음이 다양한 주파수 대역에 분포하는 것을 알 수 있다. 잡음을 추가한 상황에서 동일한 음악 재생 구간에 대해 BPSK, QPSK, 변조 방식



그림 15. 잡음을 추가한 환경에서 음파통신 테스트베드 송신단 및 수신단  
Fig. 15. Transmitter and receiver of acoustic communication testbed

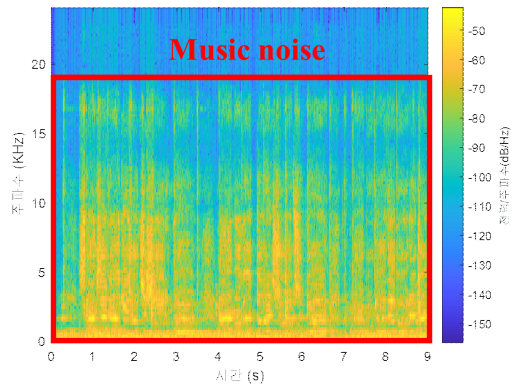


그림 16. 사용자가 수신한 추가 잡음 신호의 spectrogram 분석  
Fig. 16. Analysis spectrogram of received additional noise signal from user

표 5. 잡음을 추가한 환경에서 직교 다중접속기술과 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템 성능 비교  
Table 5. Performance comparison of OMA and NOMA based acoustic communication system in environment with additional noise

OMA			
BPSK		QPSK	
Strong user	Weak user	Strong user	Weak user
BER	BER	BER	BER
$2.72 \times 10^{-1}$	$1.51 \times 10^{-2}$	$2.94 \times 10^{-1}$	$4.33 \times 10^{-2}$
Data rate		Data rate	
4.53 Kbps		9.06 Kbps	
Spectral efficiency		Spectral efficiency	
0.236 bps/Hz		0.472 bps/Hz	
NOMA			
BPSK		QPSK	
Strong user	Weak user	Strong user	Weak user
BER	BER	BER	BER
$1.18 \times 10^{-1}$	$1.01 \times 10^{-2}$	$1.24 \times 10^{-1}$	$3.53 \times 10^{-2}$
Data rate		Data rate	
4.53 Kbps		9.06 Kbps	
Spectral efficiency		Spectral efficiency	
0.472 bps/Hz		0.944 bps/Hz	

에 따라 통신을 수행했을 때 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템과 직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템 두 경우 모두 각 사용자의 BER과 데이터 전송률, 주파수 효율성을 비교한다.

표 5는 잡음을 추가한 상황에서 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템과 직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템의 성능 표를 나타낸다. 실험 결과 BPSK, QPSK 변조 방식 모두 앞서 도출한 표 4와 같이 동일한 데이터 전송률 성능을 보이나 BER 성능과 주파수 효율성 측면에서 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템이 우수함을 보인다.

즉, 테스트베드 구축환경에서 송·수신장치에 사용한 하드웨어의 한계로 인해 사용할 수 있는 주파수 대역이 한정적인 상황에서, 구현한 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템이 직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템보다 주파수 자원을 효율적으로 사용하여 신뢰성 있는 통신을 수행한다. 그러므로 송·수신장치의 특성과 가청주파수 대역에서 환경잡음을 고려했을 때, 다수의 사용자에게 서비스를 제공하기 위해서 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신을 수행하는 것이 더 적절하다.

## V. 결 론

본 논문에서는 대기 환경에서 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템을 구현하였다. 실제로 간단한 음성장치가 내장되어 있는 노트북을 이용하여 테스트베드 구축환경에서 발생하는 환경잡음과 하드웨어 손상 문제를 분석하여 개선하였다. 이를 통해 성공적으로 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템을 설계하였고, 구현한 음파통신 시스템이 직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템보다 자원 효율성을 기반으로 사용자에게 신뢰성 있는 서비스를 제공할 수 있는 것을 검증할 수 있었다. 본 논문에서 수행한 테스트베드는 비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템을 구현한 사례라는 점에서 의미가 있다.

앞으로 강한 사용자가 SIC를 수행하기 때문에 발생하는 오류전파 문제와 수신단의 복잡도를 개선하기 위해 수신단의 딥러닝을 적용할 수 있는 방안에 대해 연구를 진행할 예정이며, 차후 이를 활용하여 가청주파수 대역을 사용하는 대규모 단말들이 존재하는 차세대 음파통신 시스템에서 요구되는 서비스를 효율적으로 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] L. Duan, et al., "Privacy threats of acoustic covert communication among smart mobile devices," *Wireless Commun. and Mobile Computing*, vol. 2021, Jul. 2021. (<https://doi.org/10.1155/2021/9179100>)
- [2] E. S. Kim and S. Y. Shin, "Audio-based drone defect detection using recurrence plot and deep learning," *J. KICS*, vol. 48, no. 1, pp. 114-122, Jan. 2023. (<https://doi.org/10.7840/kics.2023.48.1.114>)
- [3] M. Amjad and L. Musavian, "Performance analysis of NOMA for ultra-reliable and low-latency communication," *2018 IEEE GC Wkshps.*, pp. 1-5, Abu Dhabi, United Arab Emirates, Dec. 2018. (<https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2018.8644329>)
- [4] Y. Liu, et al., "Nonorthogonal multiple access for 5G and beyond," in *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 12, pp. 2347-2381, Dec. 2017. (<https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2768666>)
- [5] M. Bennis, et al., "Ultrareliable and low-latency wireless Communication: Tail, risk, and scale," in *Proc. IEEE*, vol. 106, no. 10, pp. 1834-1853, Oct. 2018. (<https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2867029>)
- [6] B. Makki, et al., "A survey of NOMA: Current status and open research challenges," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 179-189, Jan. 2020. (<https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.2969899>)
- [7] J. Cheon and H. Cho, "A multi-dimensional node pairing scheme for NOMA in underwater acoustic sensor networks," *J. KAIS*, vol. 22, no. 6, pp. 1-10, Jun. 2021. (<https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.6.1>)
- [8] M. J. Bocus, et al., "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for underwater acoustic communication," *2018 IEEE 88th VTC-Fall*, pp. 1-5, Chicago, IL, USA, Aug. 2018. (<https://doi.org/10.1109/VTCFall.2018.8690996>)
- [9] J. Fu, et al., "A novel intelligent SIC detector

for NOMA systems based on deep learning,” *2021 IEEE 93rd VTC2021-Spring*, pp. 1-6, Helsinki, Finland, Apr. 2021.  
 (https://doi.org/10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9449008)

- [10] F. Kara and H. Kaya, “BER performance of downlink and uplink NOMA in the presence of SIC errors over fading channels,” *IET Commun.*, vol. 12, no. 15, pp. 1834-1844, Sep. 2018.  
 (https://doi.org/10.1049/iet-com.2018.5278)
- [11] E. C. Cejudo, et al., “On the power allocation and constellation selection in downlink NOMA,” *2017 IEEE 86th VTC-Fall*, pp. 1-5, Toronto, ON, Canada, Sep. 2017.  
 (https://doi.org/10.1109/VTCFall.2017.8288077)
- [12] S.-J. Heo, et al., “Concatenation for PAPR reduction schemes in OFDM Systems,” *J. KICS*, vol. 45, no. 2, pp. 468-471, Feb. 2020.  
 (https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.2.289)
- [13] J.-H. Kim, et al., “A study on the timing offset estimation for pilot-based underwater CSS communication system,” *J. KICS*, vol. 46, no. 3, pp. 411-419, Mar. 2021.  
 (https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.3.411)
- [14] H. Lee, et al., “Chirp signal-based aerial acoustic communication for smart devices,” *2015 IEEE Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, pp. 2407-2415, Hong Kong, China, May. 2015.  
 (https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2015.7218629)

**김 선 민 (Seonmin Kim)**



2018년~현재 : 아주대학교 전자공학과 재학  
 <관심분야> 머신러닝, 차세대 이동통신 시스템  
 [ORCID:0009-0008-2873-9380]

**성 재 협 (Jaehyup Seong)**



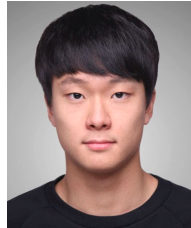
2016년~2022년 : 아주대학교 전자공학과 졸업  
 2022년~현재 : 아주대학교 AI융합네트워크학과 석사과정  
 <관심분야> 무선통신, 강화학습, 최적화 이론  
 [ORCID:0009-0000-8405-701X]

**박 주 하 (Juha Park)**



2018년~현재 : 아주대학교 전자공학과 재학  
 <관심분야> 무선통신, 비지상 네트워크  
 [ORCID:0009-0004-7521-609X]

**함 형 빈 (Hyeongbeen Ham)**



2017년~현재 : 아주대학교 전자공학과 재학  
 <관심분야> 머신러닝, 비지상 네트워크  
 [ORCID:0009-0005-2569-1201]

**신 원 재 (Wonjae Shin)**



2002년~2007년 : 한국과학기술원 전자공학 학석사 졸업  
 2007년~2013년 : 삼성전자 종합기술원 전문연구원  
 2013년~2014년 : 삼성전자 DMC 연구소 책임연구원  
 2014년~2017년 : 서울대학교 전기정보공학부 공학박사  
 2017~2018년 : Princeton 대학교 박사후연구원  
 2018~2021년 : 부산대학교 전자공학과 조교수  
 2021~현재 : 아주대학교 전자공학과 조/부교수  
 <관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 머신러닝 및 빅데이터 신호처리  
 [ORCID:0000-0001-6513-1237]