DBpia

논문 17-42-06-18 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '17-06 Vol.42 No.06
https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.6.1249

수중 융복합 시스템을 위한 OFDM 모뎀 프로토타입 설계 및 구현

전 준 호◆, 박 성 준*, 박 성 준°

Design and Implementation of OFDM Modem Prototype for Underwater Convergence Systems

Jun-Ho Jeon◆, Sung Jun Park*, Sung-Joon Park°

요 약

본 연구에서는 열악한 수중 음향채널 환경에서 높은 신뢰성을 보장하면서도 고속으로 정보를 전달하기 위해 OFDM 시스템 파라미터와 프레임 구조를 도출하였고, 이를 기반으로 수중 고속 모뎀의 프로토타입을 설계 구현하였다. 특히, 수중 모뎀에 단일 무지향성 트랜스듀서를 탑재하여 데이터 송수신이 가능하도록 함으로써 모뎀의 소형화, 활용방안 제고 및 비용 절감을 모색하였다. 또한, 구현한 모뎀 프로토타입을 사용하여 연못에서 통신 실험을 수행하였고 이를 통해 실제 활용 가능성을 검증하였다.

Key Words : Underwater Convergence Systems, Underwater Acoustic Communication, Acoustic Modem, OFDM

ABSTRACT

In this work, we propose OFDM system parameters and a frame structure for transmitting data through underwater acoustic channels with high speed and reliability and implement an underwater OFDM micro-modem prototype conforming to the proposed system design. Especially, a single transducer having omnidirectional beam pattern is applied to the modem for miniaturization, mobility support, and cost cutting. Further, communication tests in a pond are conducted to verify the functionality of the modem and to prove the feasibility of it for the future use.

Ⅰ. 서 론

지구 표면의 약 71%를 차지하는 해양에는 풍부한 청정에너지 자원과 해양생물 자원이 존재한다. 인류의 미개척지 해양의 호혜적 개발은 당면한 과제이며 바다어장 및 양식 산업 고도화를 위한 수중 생태 모니터링, 수중 초소형 로봇에 근간한 탐지 및 임무 수행, 수중 무선 정보 전송을 활용한 몰입형 해양 레저 활동, 청정 담수 및 해수 보존을 위한 수중 환경 데이터 수집 등은 해양 기반 미래 신규 융복합 산업의 대표적 사례이다.

수중 음향통신 기술은 다양한 해양 융복합 시스템

※ 이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2014R1A2A2A01006205, 2017R1A2A2A05001457).
◆ First Author : Gangwon Embedded Software Cooperative Research Center, musician1222@naver.com, 정회원
° Corresponding Author : Dept. of Electronic Engineering, Gangneung-Wonju National University, psj@ieee.org, 종신회원
* tjdwns3861@naver.com, 학생회원
논문번호 : KICS2017-04-115, Received April 19, 2017; Revised May 24, 2017; Accepted June 15, 2017

www.dbpia.co.kr

전개를 위해 선행적으로 요구되는 핵심 요소 기술이다[1-2]. 과거 군사적 목적 및 해양 탐사 용도로 연구되어온 장거리 저속 수중 음향통신 기술은 이미 기술 개발의 성숙기에 있으며 다양한 수중 모뎀이 상용화되어 판매되고 있다[3,4]. 상기 모뎀들은 통상적으로 주파수편이 변조 기법 사용하여 수 km 이상의 통신 거리를 제공하지만 크기가 크고 가격이 비싸기 때문에 공공 부문이나 대형 기간산업에의 적용이 적합하다.

한편, 수중에서는 수면 및 바닥면에서의 반사에 의해 다수의 다중경로 신호가 생성될 뿐만 아니라 수중 환경 변화와 송수신기의 이동에 따라 채널이 시간에 따라 변하는 물리적 특성을 갖는다. 따라서 수중 음향통신 시스템은 지연 확산에 따른 인접 심볼 간 간섭(intersymbol interference, ISI)과 도플러 확산에 의한 주파수축 왜곡의 영향으로 통신 품질의 저하를 겪게 된다[5,6].

상기 수중 채널에 대응하고 고속 정보 전송을 실현하기 위해 다수 개의 반송파를 사용하여 신호를 생성하고 송수신하는 수중 직교주파수분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 기법 연구가 수행되어 왔다. 즉, 선행 연구에서 수중 통신 환경에 적합한 MIMO OFDM 시스템 변수들을 설계하고 모의실험을 통해 성능을 검증하였고[7], LDPC 부호에 기반한 수중 OFDM 시스템을 제시하고 검증하였으며[8], 송신 필터 기반의 FMT-OFDM 시스템 구조를 제안하고 모의실험을 통해 성능을 분석한 바 있다[9]. 또 다른 선행 연구에서 컴퓨터 소프트웨어에 송수신 OFDM 디지털부를 가상 구현하고 상용 아날로그 기기와 수조를 활용하여 실험함으로써 수중 OFDM의 구현 가능성을 검증하였고[10], TI 사의 DSP를 활용하여 MIMO OFDM 모뎀을 구현하고 기능과 성능을 검증하고 분석한 사례도 있다[11].

본 연구는 다양한 수중 융복합 시스템에 적용하기에 적합한 범용 OFDM 시스템 구조를 제시하고 모뎀 프로토타입을 설계 구현하는 것을 목표로 하였다. 특히, 무지향 특성을 갖는 초소형 구형 트랜스듀서를 활용하여 수중 모뎀을 개발함으로써 모뎀의 크기를 최소화하고 활용도를 높이고자 하였고, 단일 트랜스듀서를 사용하여 송신과 수신이 가능하도록 설계함으로써 모뎀의 비용을 최소화하였다. 도출한 물리계층 기능들은 TI 사의 TMS320F28377D DSP 모듈에 구현하였고 아날로그 회로를 설계 제작하여 상용 트랜스듀서와 함께 모뎀 프로토타입을 완성하였으며, 연못에서 기능 검증 실험을 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 고속 수중 음향통신을 위한 시스템 모델을 소개하고, 3장과 4장에서는 OFDM 기반 수중 모뎀의 디지털부와 아날로그부의 설계 구현에 대해 각각 설명한다. 5장에서는 개발한 수중 모뎀 프로토타입의 실험 결과를 서술하고, 끝으로 6장에서 결론 및 향후 연구 방향을 제시한다.

Ⅱ. 시스템 모델

OFDM 기술에 기반한 수중 고속 음파통신 시스템의 물리계층 및 하드웨어 블록도를 그림 1에 나타내었다. 전달하고자 하는 정보 데이터는 채널부호화, 변조심볼 매핑, 역 고속 푸리에 변환(inverse fast Fourier transform, IFFT) 및 주기적 전치부호(cyclic prefix, CP) 삽입, 음파대역으로의 변조 후 필터링 및 증폭되고 수중 채널로 방사된다. 역으로, 수중 채널을 통해 수신된 음파 신호는 증폭, 필터링 후 기저대역 신호로 변환되고 송신 디지털 신호처리 역순의 수신 디지털 신호처리 후 전송 신호의 추정치로 추출된다.

송신 및 수신이 가능하도록 설계한 수중모뎀은 기능에 따라 디지털부, 아날로그부, 트랜스듀서로 구분할 수 있다. 디지털부는 송신 및 수신 기저대역 신호

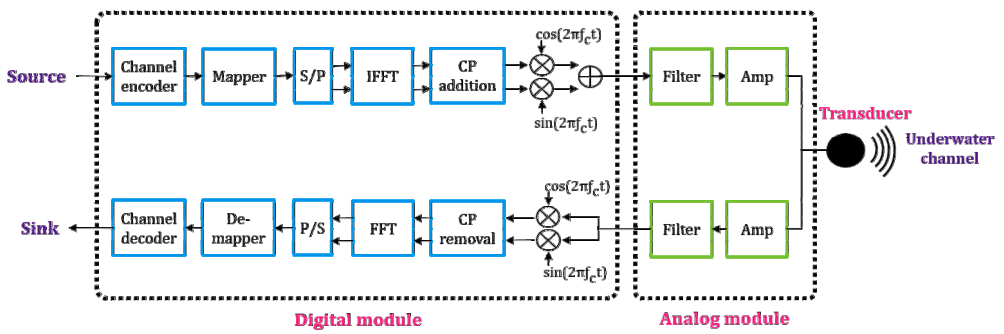


그림 1. OFDM 기반 수중 음향통신 시스템의 블록도
Fig. 1. Block diagram of OFDM-based underwater acoustic communication system

www.dbpia.co.kr

처리와 음파대역으로의 변조 및 복조 기능을 담당하며 디지털 프로세서에 구현한다. 아날로그부는 연산증폭기(operational amplifier, OP Amp)와 수동 소자 등을 활용하여 구현하며 송수신시 신호의 증폭과 필터링 기능을 수행한다. 트랜스듀서는 송신시 전기신호를 음향신호로 수신시 음향신호를 전기신호로 변환하는 기능을 수행하며 본 연구에서는 상용 트랜스듀서를 사용하였다.

Ⅲ. 디지털부 설계 및 구현

3.1 수중 OFDM 설계

수중 음향 채널에서 확보할 수 있는 대역폭은 트랜스듀서에 의해 제한된다. 본 연구에서는 소형 디바이스에 탑재가 용이하고 무지향 방사 특성을 지녀 활용도가 높은 NEPTUNE 사의 초소형 무지향성 트랜스듀서를 선택하여 사용하였다[12]. 상기 트랜스듀서의 직경은 34 mm, 공진 주파수(f_c)는 74 kHz이며, 실험을 통해 도출한 가용 주파수 대역폭(B)은 68 kHz부터 84 kHz까지의 총 16 kHz이다[13].

OFDM 기반 수중 음향통신 시스템 설계에 있어 우선적으로 고려해야 하는 물리적 현상은 지연 확산과 도플러 확산이다. 수중 다중경로에 의한 심볼 간 간섭(inter-symbol interference, ISI)을 극복하기 위해서는 최대 지연확산($\tau_{\max}$)보다 긴 길이의 보호구간(T_{cp})을 삽입해야 하고, 주파수 오프셋에 따른 부반송파 간 간섭(inter-channel interference, ICI)을 억제하기 위해서는 최대 도플러 편이($f_{D_{\max}}$)보다 넓은 부반송파 간격(subcarrier spacing, Δf)을 사용해야 한다. 여기서 수중 채널에서의 지연확산과 수표면 산란에 의한 도플러 편이는 각각 선 추적 모델[14]과 가우시안 모델[15]에 의해 예측되어질 수 있다.

표 1은 결정된 주파수 대역폭에 대해 네 가지 종류의 FFT 크기(N=256, 512, 1024, 2048)를 고려하여 설계한 수중 OFDM 시스템 파라미터이다. FFT 크기가 커질수록 오버헤드의 상대적 감소로 인해 전송속도는 증가하지만 부반송파 간격이 줄어들어 극복할 수 있는 도플러 편이가 감소한다. 반면, FFT 크기가 작아질 경우 전송속도는 감소하지만 더욱 큰 크기의 도플러 편이에 대응할 수 있다는 특징을 갖는다. 보호구간(T_{cp})은 유효심볼 길이(T)를 고려하여 16 ms로 설정하였고 이 경우 전송속도(R)는 다음의 수식에 의해 결정된다.

$$R = \frac{Bmr}{1 + T_{cp}/T} \tag{1}$$

여기서 m은 변조지수, r은 부호율을 의미하며, 표 1에 QPSK, $r = 1$일 경우의 전송속도를 수록하였다. 전송속도 개선을 위해서는 근본적으로 대역폭의 증가가 요구되나 이는 트랜스듀서의 특성에 따라 크게 제한되므로, 차선책으로 QAM 등의 고차변조를 사용함으로써 전송속도의 선형적 증가를 모색할 수 있다. 이외에도 채널환경의 변화에 따라 표 1의 FFT 크기를 적응적으로 선택하여 사용함으로써 시스템 효율을 개선할 수 있다.

생성한 OFDM 심볼들을 수중에서 송수신하기 위해 물리계층 프레임 구조를 설계하고 그림 2에 나타내었다. 통상적으로 수중에서 전송하고자 하는 데이터는 짧은 버스트 형태이므로 프리앰블과 다수 개의 OFDM 심볼들로 프레임을 구성하여 패킷 기반 전송이 가능하도록 하였다. 프레임 검출을 위해 삽입되는 프리앰블은 긴 프리앰블과 짧은 프리앰블로 나뉘며 각 프리앰블을 형성하는 복소 수열은 IEEE 802.11a 표준을 참고하여 설계하였다[16]. 즉, 짧은 프리앰블은

표 1. 수중 OFDM 시스템 파라미터
Table 1. Parameters of underwater OFDM system

Carrier frequency, f_c	76 kHz			
Bandwidth, B	16 kHz			
FFT size, N	256	512	1024	2048
Subcarrier spacing, Δf	62.5 Hz	31.25 Hz	15.625 Hz	7.8125 Hz
Effective symbol duration, T	16 ms	32 ms	64 ms	128 ms
Guard time, T_{cp}	16 ms			
OFDM symbol duration, T_s	32 ms	48 ms	80 ms	144 ms
Data rate (QPSK, no coding), R	16 kbps	21.3 kbps	25.6 kbps	28.4 kbps

www.dbpia.co.kr

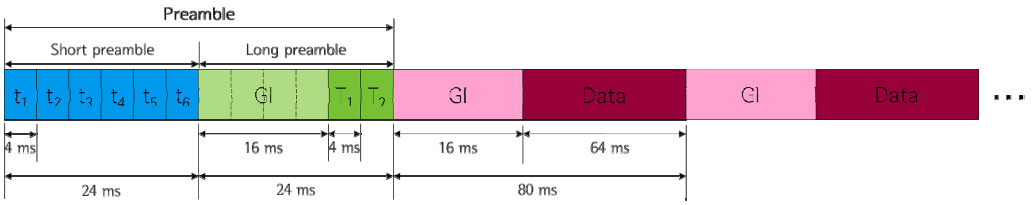


그림 2. 수중 OFDM 시스템의 물리계층 프레임 구조 (N=1024)
Fig. 2. Physical layer frame format for underwater OFDM system (N=1024)

길이가 64인 복소 수열에 대해 64-IFFT를 수행한 후 이를 6회 반복하여 생성하였고(그림 2의 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$), 긴 프리앰블 또한 길이가 64인 복소 수열을 64-IFFT한 후 2회 반복하여 생성하였다(그림 2의 T_1, T_2). 짧은 프리앰블과 긴 프리앰블 사이에는 보호구간을 삽입하여 시간 동기 획득이 용이하도록 하였고 프리앰블 이후에는 다수 개의 OFDM 심볼들이 연이어 전송되도록 설계하였다.

3.2 개발 보드

상기에서 서술한 디지털부 구현을 위한 개발 보드로 그림 3에 나타낸 TI 사의 TMS320F28377D 모듈을 사용하였다. TMS320F28377D 프로세서에는 32비트 정수형 듀얼 코어와 두 개의 보조 연산 프로세서가 탑재되어 있고, 소수형 데이터의 고속 연산을 수행할 수 있는 32비트 FPU (floating point uint)가 추가로 내장되어 있다. 각 코어는 최대 200 MHz의 동작 클럭을 사용하여 800 MIPS (million instructions per second)의 고속 연산이 가능하며 DMA (direct memory access) 기능을 사용함으로써 CPU의 부담을 줄일 수 있다. 또한, 12비트 DAC와 16비트 ADC를 내장하고 있어 별도의 DAC 및 ADC 전용 칩셋 없이도 중심 주파수 76 kHz의 변조와 복조 기능을 수행할 수 있다.

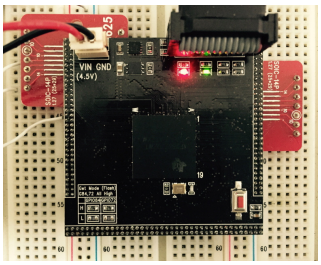


그림 3. TMS320F28377D MCU 모듈
Fig. 3. TMS320F28377D MCU module

Ⅳ. 아날로그부 설계 및 구현

디지털부 및 트랜스듀서와 정합하여 수중 OFDM 모뎀의 프로토타입을 제작하기 위해 아날로그부를 설계하고 구현하였다. 다만, 본 연구에서는 모뎀의 정상 동작 확인과 근거리 수중 통신 실험을 위해 아날로그 회로를 제작하였으며, 통신거리 최대화 또는 통신성능 개선 등을 위한 아날로그부 연구는 본 논문의 범위가 아님을 밝힌다.

그림 4는 설계한 아날로그 송신부의 회로도이다. 아날로그부 입력 신호, 즉 DAC가 완료된 TMS320F28377D 모듈의 출력 신호는 그림 4에 나타낸 대역통과 필터를 통과함으로써 전송대역 이외의 신호 세기가 억제되고, 수중 채널에서의 신호 감쇠에 대응하기 위한 증폭기를 거친 후 트랜스듀서에 공급된다. 고전력 OP Amp를 사용하여 구현한 증폭기는 각각 증폭비 10을 갖는 반전 증폭기(inverting amplifier)와 비반전 증폭기(non-inverting amplifier)가 결합된 형태의 이중 구조로 설계하였는데, 반전 증폭기와 비반전 증폭기에 동일한 신호가 인가되고 각 증폭기는 180° 위상 차를 갖는 신호를 출력하므로 최종 출력단에서의 증폭비는 각 증폭기에서 증폭한 신호의 두 배인 20이 된다.

그림 5는 저잡음 증폭기, 대역통과 필터, 바이어스 회로로 구성한 아날로그 수신부의 회로도이다. 트랜스

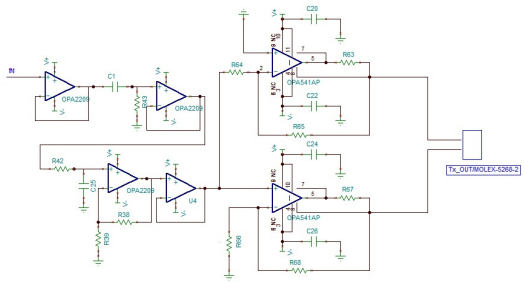


그림 4. 아날로그 송신부 회로
Fig. 4. Circuit of analog transmitter

www.dbpia.co.kr

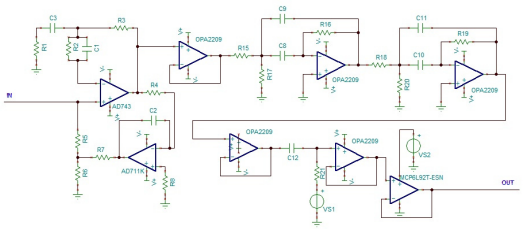


그림 5. 아날로그 수신부 회로
Fig. 5. Circuit of analog receiver

듀서에서 수신한 신호는 수중 채널을 통과하면서 크기가 감쇠된 신호이므로, 저잡음 OP Amp를 사용하여 신호 세기를 20배 증폭하는 회로를 설계하였다. 또한, 트랜스듀서의 송신 주파수 응답 특성과 수신 주파수 응답 특성을 고려하여 통과 대역인 68~84 kHz에서 균일한 이득을 갖도록 회로 설계 소프트웨어 FilterPro와 시뮬레이션 프로그램 TINA를 이용하여 대역통과 필터를 설계 구현하고 검증하였다. 수신 필터의 후단에는 바이어스 회로를 삽입하여 디지털 모듈이 인지 가능한 양전압 형태의 출력을 제공하도록 하였다.

V. 실험 결과

5.1 실험 환경

본 연구를 통해 개발한 수중 OFDM 모뎀 프로토타입의 기능을 검증하기 위해 그림 6에 나타낸 연못에서 통신 실험을 수행하였다. 연못에는 수초, 물고기, 자라 등의 수중 생물이 자생하고 있으며, 크고 작은 바위와 구조물 등이 함께 위치하고 있다. 연못의 최대 길이, 폭, 깊이는 각각 60 m, 40 m, 5 m이고, 실제로 실험을 수행한 장소는 그림 6(a)에 빨간색 타원으로 표기한 곳으로 수심은 약 1 m이다.

실험을 위해 리튬이온 배터리를 사용하여 아날로그 부에 양전원 14.8 V를 인가하였고 상시전원을 이용하여 디지털 모듈에 5 V를 공급하였다. 또한, 표 1에서

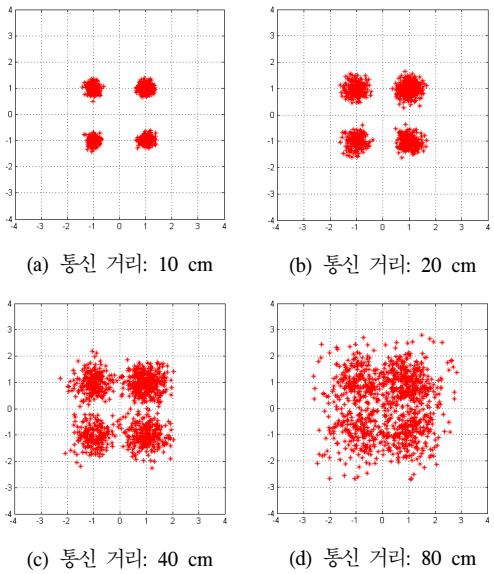
(a) 연못 전경 (b) 통신 실험 환경

그림 6. 실험 환경
Fig. 6. Experimental environment

FFT 크기가 1024인 파라미터들을 사용하였고 송신기와 수신기 간의 거리는 10 cm, 20 cm, 40 cm, 80 cm로 변경하며 실험을 수행하였다. 각 실험을 위해 전송한 OFDM 심볼은 50개, 즉 102,400 비트이며, 실험 결과 데이터를 추출하기 위해 TI 사가 제공하는 CCS (Code Composer Studio) 프로그램을 사용하였다.

5.2 실험 결과 및 분석

통신 거리에 따른 수신 심볼의 성상도를 그림 7에 나타내었다. 실험 결과에 따르면 10 cm, 20 cm 거리에서는 데이터 수신 오류가 발생하지 않았으며, 40 cm 거리에서 4.88×10^{-4}, 80 cm 거리에서 3.96×10^{-2}의 비트오율이 측정되었다. 통신 거리 증가에 따라 비트오율이 급격하게 저하되는 것은 수중 채널의 신호 대 잡음비가 열화되기 때문이며, 송신신호 세기를 증가시킴에 따라 통신 거리 증대 또는 통신 품질 개선의 효과를 획득할 수 있을 것으로 예상된다.



(a) 통신 거리: 10 cm (b) 통신 거리: 20 cm
(c) 통신 거리: 40 cm (d) 통신 거리: 80 cm

그림 7. 통신 거리에 따른 수신 심볼의 성상도
Fig. 7. Constellation of received symbols with respect to communication distance

VI. 결 론

본 논문에서는 수중 융복합 시스템에 적합한 수중 OFDM 음향통신 시스템 구조를 제시하였고, 단일 초소형 구형 트랜스듀서를 사용하여 송수신이 가능한 수중 모뎀 프로토타입을 설계 구현하였다. 또한, 구현한 수중 모뎀을 활용하여 연못에서 실험을 실시하였

www.dbpia.co.kr

고 이를 통해 OFDM 기반 고속 수중 데이터 전송이 가능함을 검증하였다.

본 논문에서 제안한 수중 고속 음파통신 시스템 구조 및 모뎀 프로토타입은 수중 융복합 시스템 개발을 위한 참고자료로 활용될 것으로 기대되며, 향후 수중 모뎀의 성능 향상을 위해서는 본 논문에서 다루지 않은 수중 채널 추정 및 보상 기법, 채널 적응적 송수신 기법, 아날로그 회로 최적화 등에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

References

[1] M. Chitre, S. Shahabudeen, and M. Stojanovic, "Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges," *J. Marine Technol. Soc.*, vol. 42, no. 1, pp. 103-116, Spring 2008.

[2] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 257-279, Feb. 2005.

[3] http://www.link-quest.com

[4] http://teledynebenthos.com

[5] M. Stojanovic and J. Preisig, "Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 1, pp. 84-89, Jan. 2009.

[6] A. C. Singer, J. K. Nelson, and S. S. Kozat, "Signal processing for underwater acoustic communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 1, pp. 90-96, Jan. 2009.

[7] D.-K. Han, B. Hui, K.-H. Chang, S.-H. Byun, S.-M. Kim, and Y.-K. Lim, "Design philosophy of MIMO OFDM system for underwater communication," *J. Korea Inst. Inf. and Commun. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 22-32, Jan. 2011.

[8] H.-W. Jeon, S.-J. Lee, and H.-N. Lee, "Underwater channel analysis and transmission method research via coded OFDM," *J. KICS*, vol. 36, no. 5, pp. 573-581, May 2011.

[9] M.-S. Kim, H.-L. Ko, S.-G. Kim, D.-Y. Cho, and T.-H. Im, "Performance improvement of FMT-OFDM system in underwater channel environment," *J. KICS*, vol. 41, no. 3, pp. 365-370, Mar. 2016.

[10] J.-W. Han, Y.-J. Son, and K.-M. Kim, "Performance analysis of acoustic communication using OFDM modulation in underwater," *J. Navig. and Port Res.*, vol. 34, no. 10, pp. 769-774, 2010.

[11] H. Yan, L. Wan, S. Zhou, Z. Shi, J.-H. Cui, J. Huang, and H. Zhou, "DSP based receiver implementation for OFDM acoustic modems," *Physical Commun.*, vol. 5, no. 1, pp. 22-32, Mar. 2012.

[12] http://www.neptune-sonar.co.uk

[13] J.-H. Jeon, S. J. Park, and S.-J. Park, "A study on frequency characteristics of a 70 kHz omni-directional transducer for underwater wideband communications," in *Proc. KICS Conf.*, pp. 357-358, Jeju Island, Korea, Jun. 2015.

[14] M. Crocker, *Encyclopedia of Acoustics*, John Wiley & Sons, 1997.

[15] M. Stojanovic, *Acoustic Underwater Communications*, John Wiley & Sons, 2003.

[16] IEEE Standard 802.11a-1999 (R2003), Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications.

전 준 호 (Jun-Ho Jeon)

2007년 2월 : 강릉원주대학교 전자공학과 학사

2009년 2월 : 강릉원주대학교 전자공학과 석사

2009년 3월~2017년 2월 : 강릉원주대학교 선임연구원

2017년 3월~현재 : 강원임베디드소프트웨어 연구센터 선임연구원

<관심분야> 임베디드시스템, 하드웨어 설계 및 구현, 무선 통신, 수중 음향통신

www.dbpia.co.kr

박 성 준 (Sung Jun Park)

2016년 8월 : 강릉원주대학교 전자공학과 학사

2016년 9월~2016년 12월 : 강릉원주대학교 전임연구원

<관심분야> 임베디드시스템

박 성 준 (Sung-Joon Park)

1996년 2월 : 연세대학교 전파공학과 학사

1998년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사

2004년 2월 : 한국과학기술원 전자전산학과 박사

2003년 9월~2005년 3월 : 삼성전자 정보통신연구소 책임연구원

2005년 4월~현재 : 강릉원주대학교 전자공학과 교수

<관심분야> 이동 통신, 수중 통신, 무선 통신 시스템 설계 및 구현

www.dbpia.co.kr