

장거리 수중통신 모뎀 플랫폼 구현 및 데이터 취득 응용 구현을 통한 기능 검증

김 승 근*

Implementation of a Long-Range Underwater Acoustic Modem Platform and Its Functional Verification via Data Acquisition Application Implementation

Seung-Geun Kim*

요 약

본 논문에서는 장거리 수중통신 모뎀 플랫폼 구현과 구현한 플랫폼을 이용한 데이터 취득 응용 구현에 대해 설명한다. 구현한 장거리 수중통신 모뎀 플랫폼은 송/수신용 배열 음향 센서, 음향 센서를 구동하는 송신 증폭기 보드, 아날로그 신호처리보드, 주제어보드, FPGA보드, 인터페이스보드, 전원공급보드 등으로 구성된다. 제작한 배열 음향 센서는 수평방향으로는 무지향성 빔패턴을 가지며, 5kHz~8kHz대역에서 사용하기에 적합하도록 개발되었다. 제작한 장거리 수중통신 모뎀 플랫폼용 보드들은 수밀구조를 갖는 원통형 하우징에 설치된다. 구현한 장거리 수중통신 모뎀 플랫폼의 기능 검증을 위해 데이터 취득 응용을 구현하였다. 데이터 취득 응용은 운용 GUI, 데이터 교환 서버, 데이터 취득 DSP 프로그램으로 구성되며, 100kHz로 샘플링된 신호를 연속적으로 송신하거나, 4개의 센서에서 수신한 신호를 100kHz로 동시에 샘플링하여 저장할 수 있다. 구현한 데이터 취득 응용은 실험역 데이터 취득을 통해 통신 신호처리 알고리즘 개선에 활용할 수 있다.

키워드 : 장거리 수중 통신 모뎀 플랫폼 구현, 수중 음파 통신, 음향 센서, 신호처리보드 구현, 데이터 취득 응용 구현

Key Words : Long-range Underwater Modem Platform Implementation, Underwater Acoustic Communications, Acoustic Sensor, Signal Processing Boards Implementation, Data Acquisition Application Implementation

ABSTRACT

In this paper, implementations of a long-range underwater acoustic modem platform and a data acquisition application on the implemented platform are described. The implemented long-range underwater acoustic modem platform is composed of an acoustic array sensor used for transmitting and receiving acoustic signal, two transmit amplifier boards for driving the acoustic array sensor, an analog signal processing board, a main control board, a FPGA board, an interface board and a power supply board. The implemented array acoustic sensor has an omni-directional beam pattern in the azimuth direction and operates properly over 5kHz~8kHz

* 본 연구는 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(수중 광역 이동통신 시스템 기술개발 1525010926).

• First and Corresponding Author : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Ocean System Engineering Research Division, sgkim@kriso.re.kr, 종신회원

논문번호 : 202111-300-D-RU, Received November 4, 2021; Revised November 14, 2021; Accepted November 18, 2021

frequency range. The implemented electric boards are installed in a waterproof cylindrical housing. To verify the function of the implemented long-range underwater acoustic modem platform, a data acquisition application is implemented. The implemented data acquisition application is composed of a control and monitoring GUI, a data exchange server and a data acquiring DSP program, and it can repeatedly transmit a signal at 100 kHz sample rate or can save synchronously sampled received signal from 4 acoustic sensors at 100 kHz sample rate. It can be used to improve modem signal processing algorithms with the acquired real-sea data.

I. 서 론

지구 표면적의 약 70%를 차지하는 바다에서 수중 무선 통신은 음파, 광, MI (Magnetic Induction), RF 등을 이용한 방법이 가능하다. MI와 RF는 바닷물의 큰 감쇠로 인하여 통신거리가 10m 내외로 제한적이고, 광통신은 100m내외의 거리까지 통신이 가능하지만 물속의 탁도 등에 따라 통신거리의 변화가 많다¹⁾. 100m 이상의 통신이 필요한 경우에는 음파를 이용하는 것이 유일한 방법이다²⁾. 수중에서 음파는 전파 속도는 약 1,500 m/s로 육상의 RF통신에 비해 약 20만 배 느린 속도로 전파한다. 통신거리에 따라 사용가능한 주파수의 제약으로 통신 주파수 대역이 수 kHz~수 십 kHz 정도로 매우 협소한 대역폭을 사용하기 때문에 데이터 전송속도가 매우 낮다^{1,3)}.

바닷물 속에서 음파의 전달은 신호의 흡수에 의한 감쇠에 의해 사용할 수 있는 대역폭의 제한을 받는다. 거리가 가까우면 상대적으로 넓은 대역폭을 사용 가능하나, 통신 거리가 긴 경우에는 사용할 수 있는 대역폭이 좁아지는 특성이 있다³⁾. 그러므로, 수중통신에서 전송거리가 길어지면, 협소한 가용 대역폭으로 인해 도달 가능한 전송속도가 낮아지는 관계가 있다.

한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소에서는 30km 거리에서 100bps의 전송속도를 갖는 장거리 수중통신 모뎀을 개발하고 있다. 이러한 장거리 수중통신 모뎀은 원거리에 떨어져 있는 노드간에 단문 메시지 전송에 활용될 수 있을 것이다. 30km라는 장거리통신을 위하여 신호처리 알고리즘을 개발함과 동시에 장거리 수중통신을 위한 모뎀 플랫폼 개발을 진행하였다. 본 논문에서는 장거리 수중통신 모뎀 개발을 위해 구현한 장거리 수중통신 모뎀 플랫폼에 대해 설명한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 장거리 음향 센서 및 플랫폼 전자부를 구성하는 보드들의 구현에 대해 설명한다. 제 3장에서는 구현한 장거리 모뎀 플랫폼을 사용하여 신호를 취득할 수 있는 응용 구현과 구현된 기능의 동작 검증에 대해 설명하며, 마

지막으로 제 4장에서 결론을 맺는다.

II. 장거리 수중통신 모뎀 플랫폼 구현

본 장에서는 장거리 수중통신 모뎀 플랫폼 구현에 대해 설명한다. 장거리모뎀 플랫폼의 수중부는 수중 모뎀 하우징에 포함하는 배열 음향 센서와 송신증폭기 보드, 아날로그 신호처리보드, FPGA보드 및 제어 어보드 등으로 구성되어 수중에서의 신호 송신과 수신 등의 기능을 담당한다. 수상부는 수중통신모뎀 제어와 모니터링을 위한 데이터 교환과 수중 플랫폼의 동작에 필요한 전원공급을 담당한다. 본 장에서는 수중부에 중점을 두어 설명한다.

2.1 장거리 수중통신 모뎀 개요

본 논문에서 설명하는 플랫폼이 사용될 장거리 수중통신 모뎀은 수중 30km거리에서 100bps이상의 전송속도를 갖는 것을 목표로 개발하고 있다. 수중에서 장거리 전송을 할 수 있는 현재까지 알려진 유일한 방법은 음파를 이용하는 것이고, 전송하려는 거리가 멀어짐에 따라 사용할 수 있는 반송주파수는 낮아지고, 가용한 대역폭은 줄어들는다³⁾. 이는 주로 주파수가 높아짐에 따라 바닷물에서 음파의 흡음이 높아져 신호 감쇠가 커지고, 주파수에 따라 환경잡음의 특성을 달리하기 때문이다^{3,4)}.

수중에서 30km의 장거리에 걸쳐 음파를 전달하기 위해 음파의 흡음계수와 환경잡음을 고려하여 반송주파수 대역을 6.25kHz로 선정하였다. 또한, 수중의 다중경로와 장거리 통신 환경에 적합한 직접수열확산대역방식을 사용하고, 확산계수는 16으로 설계하였다. 확산 칩심볼율은 구현의 편의성을 고려하여 반송주파수의 1/4인 1.5625kchip/sec로 설계하였다. 이에 따라, 데이터를 전송하는 정보 심볼율은 약 97.6 sps이고, 정보 심볼당 2 bit의 정보를 전송하도록 하여 목표로 하는 100bps 이상의 전송속도를 갖도록 설계하였다.

2.2 장거리 수중통신용 음향 센서 제작

장거리 수중통신은 앞에서 설명한 것과 같이 음파

를 이용하여 신호를 전송하며, 음향 센서는 RF통신에서 안테나와 유사한 역할을 수행한다. 음향 센서는 전기적 신호와 기계적 진동간 상호 변환이 가능한 압전 소자를 이용하여 제작한다. 송신을 하는 경우에는 전기 신호를 음향 센서로 보내 기계적 진동을 일으켜 음파신호를 발생하며, 수신을 하는 경우에는 음향 센서에 도달한 음파에 의한 진동을 전기 신호로 변환한다.

장거리 수중통신을 위해 선정된 반송주파수 대역과 송신 예정 신호의 대역폭을 고려하여 사용 주파수 대역을 5kHz~8kHz인 배열 음향 센서를 제작하였다. 제작한 배열 음향 센서의 수평방향 빔패턴은 무지향 특성을 갖고, 송신신호의 크기를 증가시키기 위해 4개의 센서를 배열하는 구조를 갖는다.

그림 1에 배열 음향 센서를 구성하는 단일 음향 센서의 형상을 나타내었다. 단일 음향 센서는 커버와 가이드를 포함하여 직경이 184mm이고, 높이가 114mm인 내부가 비어있는 원기둥 형태이다. 단일 음향 센서는 10개를 제작하였으며, 제작한 단일 음향 센서의 수중임피던스 특성을 측정된 결과가 그림 2에 있다. 제작한 단일 음향 센서는 수중에서 약 5.4kHz에서 공진주파수를 갖는다. 제작한 단일 음향 센서의 임피던스

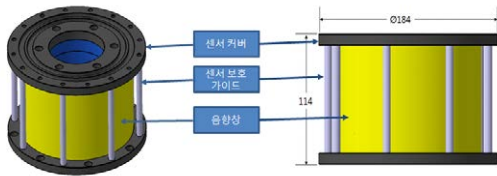


그림 1. 제작한 단일 음향 센서 형상
Fig. 1. Shape of implemented unit acoustic sensor

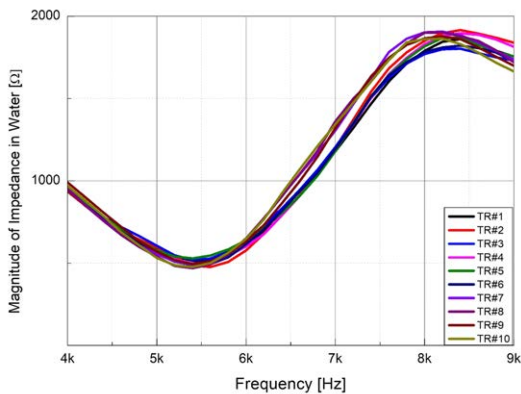


그림 2. 단일 음향 센서의 수중임피던스
Fig. 2. Impedance of unit acoustic sensor measured in water

는 공진주파수에서 약 500Ω이고, 8kHz 근처에서 약 1840Ω이 되어, 임피던스 변화는 약 1340Ω이다. 그림 3에 단일 음향 센서의 송신전압감도(TVR: Transmitting Voltage Response)를 측정된 결과를 5kHz~8kHz대역에 대해 나타내었다. 측정결과 송신전압감도는 137~141dB re uPa/V@1m의 범위를 가졌다. 또한, 그림 4에 단일 음향 센서의 수신전압감도(RVS: Receiving Voltage Sensitivity)를 측정된 결과를 5kHz~8kHz 대역에 대해 나타내었다. 측정결과 수신전압감도는 -174~-168 dB re V/uPa의 범위를 가졌다. 제작한 센서의 수평방향 빔패턴은 그림 5와 같이 무지향성을 갖는 것으로 측정되었다. 그림 5의 TR#5와 같이 제작한 센서 일부가 고르지 않은 빔패턴을 가지고 있어 수평방향 빔패턴의 편차가 최대 2.3dB로 측정되었다. 제작한 10개의 센서 중 수평방향 빔패턴이 고르지 않은 2개의 센서를 제외한 8개 센서의 수평방향 빔패턴의 편차는 최대 1.5dB이고, 평

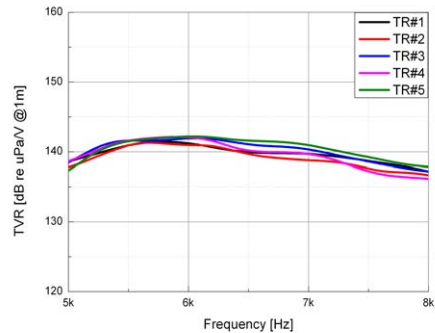


그림 3. 단일 음향 센서의 송신전압감도
Fig. 3. Transmitting voltage response(TVR) of unit acoustic sensor

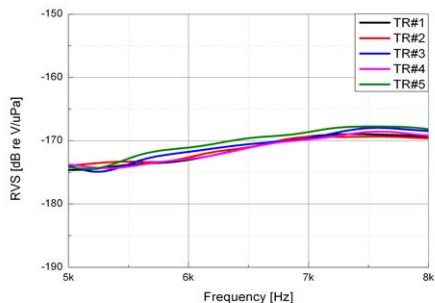


그림 4. 단일 음향 센서의 수신전압감도
Fig. 4. Receiving voltage sensitivity(RVS) of unit acoustic sensor

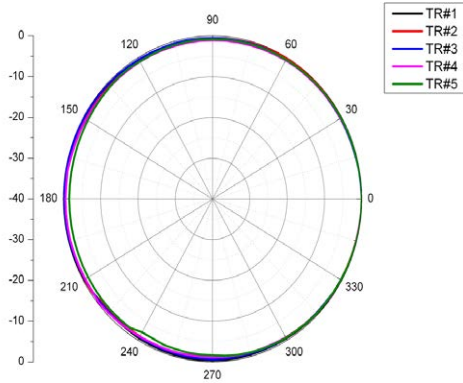


그림 5. 6.5kHz에서 단일 음향 센서의 수평방향 빔패턴
Fig. 5. Azimuth beam pattern of unit acoustic sensor at 6.5kHz

균 1.1dB의 편차를 갖는다.

제작한 단일 음향 센서 10개 중에서 특성이 좋은 8개를 선정하여 각각 4개씩 배열하여 2개의 배열 음향 센서를 최종적으로 제작하였다. 제작한 배열 음향 센서의 공진주파수는 5.8kHz이고, 그림 6에서와 같이 수중임피던스는 107Ω에서 492Ω사이의 값을 갖는다.

배열 음향 센서의 송신전압감도를 측정된 결과를 그림 7에 나타내었다. 측정결과에서 보면, 단일 음향 센서 4개를 배열하고 송신하였기 때문에 송신전압감도는 약 12dB의 감도향상이 있음을 확인할 수 있다.

배열 음향 센서의 수평방향 빔패턴은 그림 8과 같이 측정되었으며, 두 개의 배열 음향 센서 모두 수평방향으로는 무지향성을 갖으며 그 편차는 0.87dB 이내로 측정되었다.

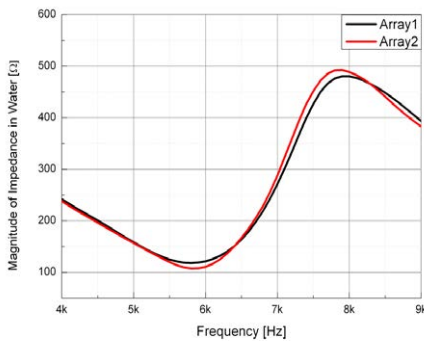


그림 6. 배열 음향 센서의 수중임피던스
Fig. 6. Impedance of array acoustic sensor measured in water

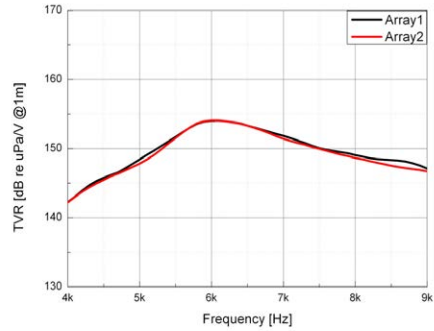


그림 7. 배열 음향 센서의 송신전압감도
Fig. 7. TVR of array acoustic sensor

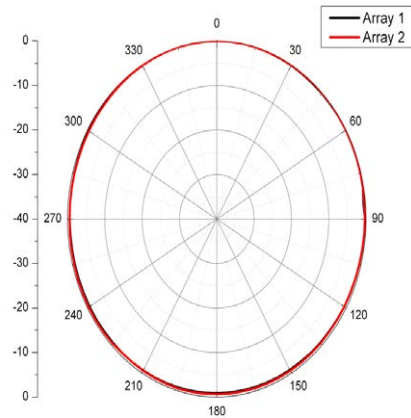


그림 8. 6.5kHz에서 배열 음향 센서의 수평방향 빔패턴
Fig. 8. Azimuth beam pattern of array acoustic sensor at 6.5kHz

2.3 장거리 수중통신 아날로그 신호처리부

장거리 수중통신모뎀 플랫폼이 송신모드로 동작하는 경우에는 반송주파수 대역으로 변조된 신호를 DAC변환하여 아날로그 신호로 만들고, 이를 증폭한 후 음향 센서로 전달하여 신호를 송신하는 기능을 수행하여야 한다. 신호 송신기능 수행을 위해 DAC 변환기능과 송신 신호 증폭 기능을 구현하였다.

DAC 변환 기능은 장거리 수중통신 모뎀의 반송주파수의 16배인 100kHz의 변환율을 지원할 수 있게 구현하였다. DAC 칩으로는 동작전압이 ±5V전원에서 동작이 가능하고, 4채널 16 bit분해능을 갖고, 24 bit 길이의 SPI 인터페이스로 동작을 제어하는 아날로그 디바이스사의 AD5754^[5]를 적용하였다. AD5754는 Power-down 모드를 지원하고 있어, 플랫폼이 수신모드로 동작하는 경우에는 제어에 의해 소비전력을 줄일 수 있는 장점이 있다. DAC의 기준전압으로

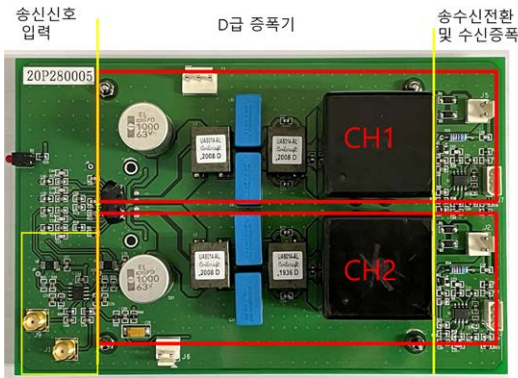


그림 9. 송신증폭기 보드
Fig. 9. Transmit amplifier board

2.048V를 입력하고, 레지스터 설정을 통해 DAC의 출력 신호는 $-4.096V \sim +4.096V$ 범위를 갖도록 하였다. DAC 출력 신호에 존재하는 DAC 변환 잡음을 줄이기 위해 통과대역이 13kHz까지인 1차 LPF를 DAC 출력에 두었다.

LPF를 거친 DAC 출력신호를 증폭하여 음향 센서로 전달하기 위해 송신증폭기를 구현하였다. 구현된 송신증폭기는 한 개의 보드에 2채널의 D급 앰프기능을 포함하고 있으며, 입력된 송신 신호를 약 190배 증폭하여 음향 센서로 출력한다. 송신증폭기 보드의 동작을 위해 12V와 48V의 전원공급이 필요하다.

장거리 수중통신모뎀 플랫폼이 수신모드로 동작하는 경우에는 수신한 신호를 증폭하고, 대역필터를 거친 후 ADC변환하여 이산 신호로 만든다. 이산 신호로 변환된 신호는 추가적인 신호처리 과정을 거친다. 신호 수신 기능 수행을 위해 아날로그 신호 증폭기능과 ADC 변환기능을 구현하였다.

아날로그 신호 증폭기능은 송신증폭기 보드와 아날로그 신호처리 보드가 연동하여 기능을 수행한다. 송신증폭기 보드에서 음향 센서의 수신신호전압을 20배 고정 이득으로 1차 증폭하여 차동신호로 아날로그 신호처리보드로 전달한다. 1차 증폭한 수신신호가 공간 상으로 떨어져 있는 2차 수신증폭기로 전달하는 과정에서 인가될 수 있는 잡음의 영향을 최소화하기 위해 차동신호로 전달한다. 아날로그 신호처리보드에 위치한 2차 수신 증폭기는 제어 설정에 의해 약 6dB간격으로 8단계에 걸쳐 8.3dB~53.4dB 사이의 전력증폭을 수행하면서 차동입력 신호를 single-ended 신호로 변환한다. 2차까지 증폭된 수신신호는 대역의 신호와 잡음을 제거하기 위해 대역통과필터를 거친다. 대역통과필터는 TI사의 Filter Pro Desktop을 이용하여 통과

대역은 중심주파수 6.3kHz에서 대역폭 4kHz를 적용한 8차 BPF를 설계하여 적용하였다. 이때, 그림 10에서와 같이 BPF 구현을 위해 OP-Amp의 Gain-Bandwidth는 3.62MHz 이상이 필요한 것으로 분석되었으며, 구현시 필요 대역폭 이상을 지원하는 Op-Amp를 선정하였다.

대역통과필터를 거친 신호는 ADC칩으로 연결되어, 100kHz의 샘플율로 샘플링된다. ADC칩으로는 4채널 동시샘플링을 지원하고, 24bit 분해능을 갖는 아날로그 디바이스사의 AD7768-4^[6]를 사용하였다. AD7768-4는 차동신호를 입력신호로 받으므로, 대역통과필터의 출력을 차동신호로 변환하여 ADC모듈에 전달한다.

앞에서 설명한 4개의 채널에 대한 DAC기능, 아날로그 신호처리부 기능 및 ADC기능들이 그림 11의 아날로그 신호처리 보드에 구현되어 있다. 제작한 보드의 직경은 90mm이다.

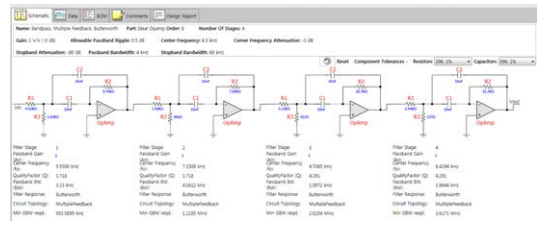


그림 10. Filter Pro Desktop을 이용한 대역통과 필터 설계 결과
Fig. 10. BPF design result using Filter Pro Desktop

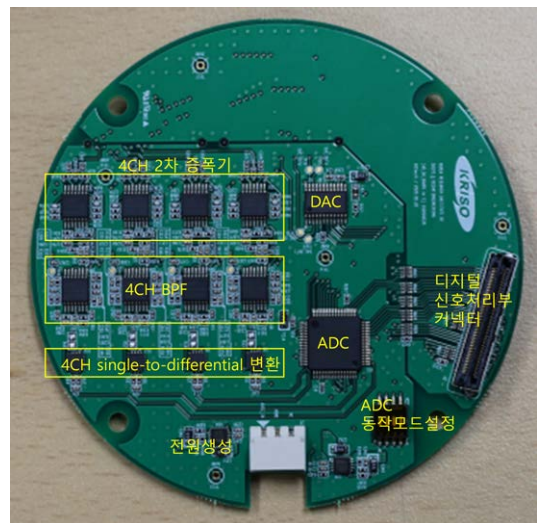


그림 11. 아날로그 신호처리 보드
Fig. 11. Analog signal processing board

2.4 디지털 신호처리부

장거리수중통신 모뎀 플랫폼의 디지털 신호처리부는 주제어보드와 FPGA보드로 구성된다. 주제어보드는 플랫폼 제어와 신호처리를 담당하며, TI사의 OMAP-L137^[7] 칩을 기반으로 제작되었다. FPGA보드는 주제어보드와 연동하여 ADC, DAC 및 아날로그 신호처리보드 등을 제어한다. 구현한 주제어보드와 FPGA보드를 그림 12와 그림 13에 각각 나타내었다.

주제어보드의 OMAP-L137 칩 내부에는 ARM 프로세서와 DSP프로세서가 각각 1개씩 포함하고 있으며, 두 프로세서간 데이터 교환을 위해 두 프로세서에

서 공통으로 읽기/쓰기가 가능한 DPRAM (Dual-port RAM)을 두고 있다. 장거리 수중통신모뎀 구현시 물리계층의 신호처리 알고리즘은 DSP 프로세서와 FPGA를 이용하여 구현할 계획이고, 네트워크 계층 알고리즘, 모뎀의 제어와 모니터링 GUI와 통신 등은 ARM 프로세서에서 담당하여 구현할 계획이다.

FPGA보드는 Xilinx FPGA를 포함하고 있으며, 이더넷 통신을 위한 PHY 칩과 이더넷 커넥터를 포함하고 있으며, OMAP-L137의 UART 통신을 RS-232 통신으로 신호변환하는 칩 등을 포함하고 있으며, FPGA보드와 주제어보드 동작에 필요한 전원을 생성하여 공급한다. FPGA에서는 OMAP-L137에서 ADC/DAC의 제어를 위한 신호선 연결, 플랫폼 동작에 필요한 클럭생성 등의 기능을 담당한다. 또한, 주제어보드의 프로세서와 아날로그신호처리 보드를 연결하는 기능을 수행한다.

2.5 플랫폼 전원생성 및 보드간 인터페이스

전원생성보드는 수중케이블을 통해 장거리모뎀 수중 플랫폼 외부에서 300V DC 신호를 입력받아 플랫폼의 동작에 필요한 전원을 생성하는 역할을 담당한다. 송신 증폭기보드 동작을 위해 48V와 12V의 전원을 생성하고, 아날로그 신호처리보드를 위해 5.5V의 전원을 생성하고, 주제어보드 및 FPGA보드를 위해 5V의 전원을 생성한다. 그림 14에 전원생성보드를 나타내었으며, 48V 생성모듈은 보드의 뒷면에 장착되어 있어 그림에는 표시되지 않았다. 48V의 전원은 신호를 송신할 때 만 사용하기 때문에 프로세서의 제어에 의해 켜거나 끌 수 있도록 제작하였다.

인터페이스 보드는 주제어보드, FPGA보드, 아날로그 신호처리보드와 송신증폭기보드, 전원생성보드 간에 전원공급 및 신호선 연결을 위한 커넥터 연결을 담당한다. 전원보드에서 5V와 5.5V 전원을 인터페이스 보드에 연결하고, 인터페이스 보드는 전원 필터링을 거쳐 각 보드로 전원을 분배한다. 신호 송신을 위해 인터페이스 보드는 아날로그 신호처리보드에서 생성한 DAC 출력 신호를 입력받아 저역통과필터링 후 SMA커넥터를 통하여 송신증폭기보드로 출력한다. 신호 수신을 위해 인터페이스 보드는 송신 증폭기보드에 위치한 1차 수신증폭기로부터 신호를 받아 아날로그 신호처리보드로 연결한다.

주제어보드, FPGA보드, 아날로그 신호처리보드 및 인터페이스보드는 그림 15와 같이 서로 결합하여 사용하도록 구현되었다.

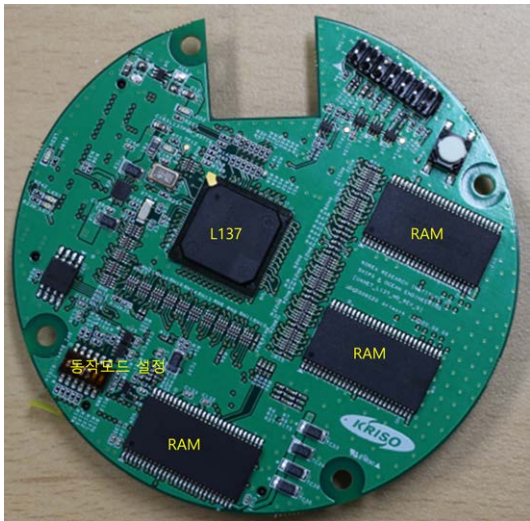


그림 12. 주제어보드
Fig. 12. Main control board

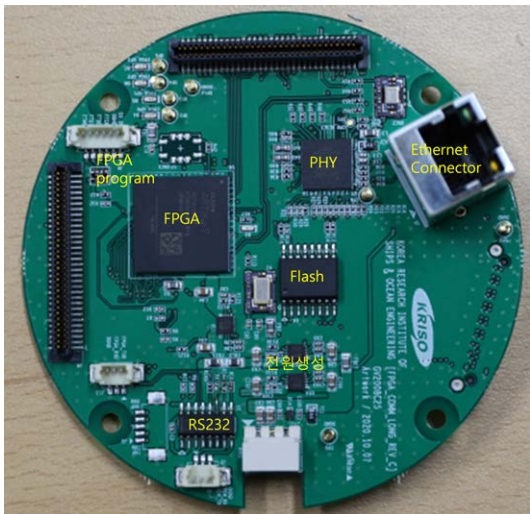


그림 13. FPGA보드
Fig. 13. FPGA board



그림 14. 전원생성보드
Fig. 14. Power supply board



그림 15. 주제어보드, FPGA보드, 아날로그 신호처리보드 및 인터페이스보드 결합
Fig. 15. Stacking shape of main control board, FPGA board, analog signal processing board and interface board

2.6 플랫폼 제어 및 전원 공급

앞에서 설명한 보드들을 장거리모뎀 하우징에 설치하기 위해 하우징 결합 판넬위에 배치 후 모습이 그림 16에 있다. 그림 16에서 보듯이 신호처리 보드들과 결합된 인터페이스보드와 2개의 송신중폭기 보드가 판넬의 앞면에 배치되고, 전원공급보드는 판넬의 뒷면에 배치되어 있다.

수중에 설치되는 플랫폼에 전원공급과 플랫폼을 제어 및 모니터링을 위한 통신은 수중케이블을 통하여 이루어진다. 150m 내외의 길이를 갖는 수중케이블을 통해 통신을 하기 위해 RS-232를 RS-422 신호로 변환하여 115,200 baud의 속도로 통신을 수행한다. 또한, 수중케이블 내의 선로수 제약 및 지원가능한 신호 속도의 제한으로 이더넷 데이터는 DSL 모뎀을 통하여 데이터를 교환하도록 하였다.

수중 플랫폼에 전원 공급 및 제어를 위해 선상 유닛을 구현하였다. 선상 유닛은 220V AC전원을 입력으로 하여, 장거리모뎀 플랫폼에 필요한 300V DC 전원을 생성하여 케이블을 통하여 수중 장거리 모뎀 플랫폼에 공급하고, 수중 장거리 모뎀 플랫폼을 제어 및



그림 16. 장거리 수중통신 모뎀 플랫폼의 전자부
Fig. 16. Electric part of long-range underwater modem platform

모니터링을 위해 DSL 모뎀과 RS422- to-RS232 변환 모듈을 내장하고 있다. 선상유닛은 모뎀 모니터링 및 제어를 위한 운용 PC와 이더넷과 RS-232 통신을 연결한다.

Ⅲ. 장거리수중통신모뎀 플랫폼을 이용한 데이터취득 응용 구현

제2장에서 설명한 장거리 수중통신 모뎀 플랫폼은 수밀구조를 갖는 하우징에 조립되고, 그 형상과 크기는 그림 17과 같다. 플랫폼의 센서부는 668mm의 길이이고, 전자부 길이는 663mm에 직경이 240mm인 원통형 구조를 갖는다. 본 장에서는 구현한 장거리 수중통신 모뎀 플랫폼의 기능 검증 및 수중장거리통신 모뎀의 신호처리 알고리즘 개선을 위해 구현한 플랫폼을 이용하여 실험역 데이터 취득을 할 수 있는 응용장치를 구현한 것에 대해 설명한다.

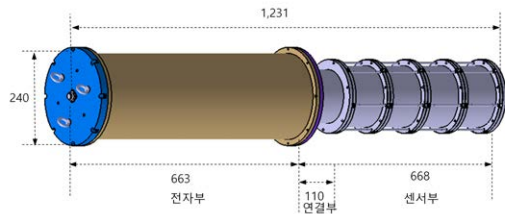


그림 17. 장거리 수중통신 모뎀 플랫폼 형상 및 크기
Fig. 17. Shape and size of underwater acoustic modem platform

3.1 데이터 취득 응용의 기능

데이터 취득을 위해서는 신호를 송신하는 기능과 수신하는 기능의 구현이 필요하다. 송신 기능에서는 100kHz로 샘플링하여 파일로 저장된 신호를 반복하여 보내고, 수신 기능에서는 4개의 음향 센서에서 수신한 신호를 100kHz로 동시에 샘플링하여 파일로 저장하는 데이터 취득 응용 구현에 대해 설명한다.

데이터 취득 응용 구현은 크게 운용 GUI, 데이터 교환 서버, 데이터 취득 DSP 프로그램으로 구성된다.

운용 GUI는 사용자 제어 메시지를 송/수신하거나, 송신 신호 데이터를 플랫폼에 전달하거나, 수신 샘플 데이터를 파일로 저장하는 기능을 수행한다. 데이터 교환 서버는 주제어보드에 있는 OMAP- L137의 ARM 프로세서에서 Linux 기반으로 동작하며, GUI와 DSP 프로세서간 데이터 및 제어명령을 전달하는 역할을 수행한다. DSP 프로세서는 FPGA와 ADC/DAC 칩들을 운용하여 GUI부터 전달받은 데이터를 DAC 변환하여 송신하거나, 수신한 신호를 ADC변환하여 GUI로 전달하는 기능을 수행한다.

운용 GUI와 데이터 교환 서버간에는 송/수신 샘플 데이터 전달용과 명령 전달용으로 이더넷 포트 2개를 사용한다.

3.2 데이터 취득 운용 GUI

데이터 취득 응용 GUI는 그림 18과 같이 구성된다. 그림 18은 수신모드로 동작하는 경우에 대한 출력화면이다. 위에서부터 첫 번째 그래프는 취득한 데이터의 시계열값을 그린 것이고, 두 번째 그래프는 시계열 데이터에 대한 스펙트럼을 그린 것이다. 세 번째 블록은 GUI와 서버간 명령 전송 로그 및 송/수 데이터 샘플값 등을 표시하고, 그 아래로 버튼 형태로 데이터 취득 동작을 제어하도록 하였다.

신호를 송신하는 경우, 파일로 저장된 송신데이터를 읽어 메모리에 보관하고, 데이터 송신이 시작되면 데이터 교환서버의 요청에 의해 4초간의 데이터를 순차적으로 보내주며, 마지막 송신데이터를 보낸 후 다시 데이터의 처음부터 반복하여 전송한다. 송신 데이터의 길이가 4초의 배수가 아닌 경우는 마지막부분에 0의 데이터를 추가하여 4초의 배수 길이를 갖도록 만

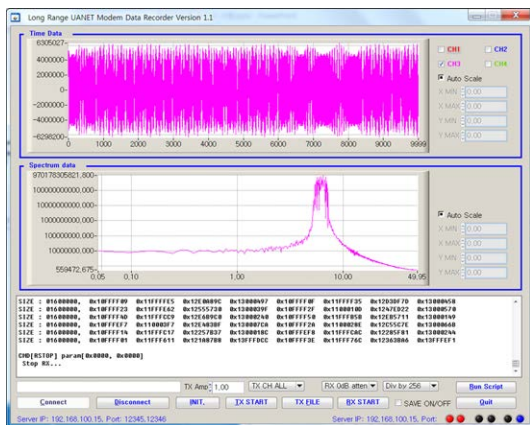


그림 18. 데이터 취득 응용 GUI
Fig. 18. GUI for data acquisition application

들어 데이터를 전송한다. 또한, 운용자의 제어에 의해 데이터 송신 종료 후 다시 전송을 시작하는 경우에는 송신 데이터 시작샘플부터 보내도록 하였다. 송신 데이터의 크기를 줄여 음향 센서의 출력을 줄일 수 있으며, 송신시 사용하는 음향 센서는 4개의 센서를 모두 사용하는 경우와 지정된 하나의 센서만 사용하는 경우를 설정할 수 있도록 하였다.

신호 수신시에는 데이터 교환서버가 보내주는 샘플 데이터를 그림 18과 같이 화면에 시계열 데이터와 주파수 스펙트럼을 표시한다. 이때, 사용자의 선택에 따라 수신한 데이터를 파일로 저장할 수도 있다. 수신모드 동작시, 아날로그신호처리보드의 제2 증폭기의 이득을 8단계에 걸쳐 제어할 수 있다.

3.3 데이터 교환 서버

데이터 교환 서버는 ARM프로세서에서 Linux기반으로 동작하며, GUI와 데이터 취득 DSP 프로그램 간에 원활한 데이터 교환 및 명령전달의 기능을 수행한다.

데이터 취득 응용이 송신모드로 동작할 때, GUI가 보낸 데이터 전송 시작 명령을 DSP에 전달하면, 데이터 교환 서버는 운용 GUI에 4초간의 송신 데이터를 두 번 요청하여 두 개의 버퍼에 송신 데이터를 채운 후, 100ms 길이의 송신 데이터를 DSP에 전달한다. 데이터 송신시, 끊임없이 DAC 변환이 이루어 질 수 있도록 데이터 교환 서버는 4초 크기의 버퍼 두 개를 사용한다. 하나는 현재 송신 데이터를 보관하는데 사용하고, 다른 하나는 앞으로 보낼 데이터를 GUI로부터 받아 저장하는 용도로 사용한다. 또한, 데이터 교환 서버와 DSP간에는 100ms 크기의 버퍼를 두 개 사용하여 앞에서와 동일한 방식으로 운용한다. 데이터 교환 서버에서 DSP로의 데이터 전달에는 ARM과 DSP에서 공동으로 접근 가능한 DPRAM을 사용한다. DSP는 100ms 크기의 버퍼에 있는 데이터 송신 완료 후, 새로운 데이터 전달을 요청한다. 데이터 교환 서버에서는 이를 10ms간격으로 모니터링하여 순차적으로 다음에 보낼 100ms 길이의 데이터를 DPRAM을 통하여 전달한다.

데이터 취득 응용이 수신 모드로 동작할 때, 4개의 센서를 통해 수신된 데이터가 100kHz의 샘플율로 ADC에서 변환된 데이터를 DPRAM에 설정한 버퍼에 저장한다. DPRAM에는 25ms 길이를 갖는 두 개의 버퍼를 사용한다. 한 DPRAM 버퍼에 데이터 기록이 완료되면, 데이터 교환 서버로 ADC 데이터가 준비되었음을 데이터 취득 DSP 프로그램이 알린다. 데이터

교환 서버는 데이터 준비가 된 것을 확인하면, 데이터 손실을 막기 위해 DPRAM 버퍼에 데이터를 2초 길이를 갖는 데이터 교환 서버의 버퍼에 복사한 후 GUI로 전송한다. 이러한 처리과정을 통해 ADC에서 샘플링한 데이터를 손실 없이 GUI로 전달할 수 있다.

3.4 데이터 취득 DSP 프로그램

데이터 취득 DSP 프로그램은 DSP에서 동작하는 프로그램으로 FPGA와 함께 ADC/DAC 칩을 구동하여 신호를 송신하고, 수신한 신호를 취득하는 역할을 담당한다.

송신 모드로 동작하기 위해 신호 송신 명령을 GUI로부터 받으면, 버퍼에 남아 있는 데이터를 비우고, 데이터 교환 서버에 송신 데이터 전송을 요청한다. 100ms 동안 보낼 송신 데이터가 전달되면, 데이터를 순차적으로 DAC 변환을 위해 데이터를 전송하고, 이와 동시에 다음 100ms 동안 보낼 송신 데이터 전달을 데이터 교환 서버에 요청한다. 현재 보내고 있는 100ms 길이의 송신 데이터를 모두 보낸 후 미리 받은 다음 100ms 동안 보낼 데이터를 순차적으로 보냄과 동시에 다음 100ms 길이의 송신 데이터 전달을 데이터 교환 서버에게 요청하는 과정을 신호 송신이 종료될 때까지 반복하여 수행한다.

100kHz의 정확한 DAC 변환을 위해, FPGA에서 외부 클럭을 이용하여 100kHz의 신호를 생성하고, 이와 동기된 송신 데이터 전달을 위한 DAC 통신 프로토콜 제어 신호를 생성하여 DSP와 DAC에 제공한다. DSP에서 DAC로 데이터 전송을 위해, OMAP-L137이 제공하는 McASP^[8] 통신 포트를 Slave FSB 인터페이스로 동작하도록 설정하였으며, FPGA에서 Master FSB 인터페이스 동작과 Master SPI 인터페이스 동작을 하도록 하였다. GUI에서 한 샘플데이터를 32bit 데이터 형식으로 전송하며, 이중 상위 8bit는 정보가 없는 데이터이고, DAC에 전송해야 하는 데이터는 하위 24bit 이다. 이를 위해 FPGA에서는 DAC로

데이터 전송시 DSP가 32bit 데이터를 보내는 중 하위 24bit만 DAC로 전달되도록 그림 19와 같이 제어를 수행한다. 그림에서 노란색으로 표시된 FSB방식의 전송시작신호(FS 신호)를 기준으로 DSP가 32bit 데이터를 전송하고, 앞 8bit에 해당하는 시간이 지난 후 녹색으로 표시된 SPI 인터페이스 방식의 CE 신호가 Low-active가 되어 DAC로 하위 24bit 데이터를 전달한다. 전달받은 데이터는 100kHz 변환율을 갖도록 FPGA가 생성한 데이터 변환 제어신호에 의해 데이터에 해당하는 아날로그 신호로 변환된다.

수신 모드로 동작하기 위해 신호 수신 명령을 GUI로부터 받으면, DSP는 동작모드를 수신모드로 변환한다. ADC 칩으로부터 받은 4채널의 데이터를 순차적으로 버퍼에 보관하고, 보관 길이가 25ms가 되면, 데이터 교환 서버에게 수신데이터가 준비되었음을 알린다. 수신 샘플보관을 위해 25ms 길이의 버퍼를 두 개를 두고, 하나는 현재 ADC 데이터를 보관하는데 사용하고, 다른 하나는 보관된 데이터를 GUI로 전송하는데 사용한다. 25ms 이후에는 두 개의 버퍼의 기능을 바꾸어 데이터 손실 없이 샘플링한 데이터를 GUI에 전달하도록 한다.

ADC칩은 25.6MHz의 클럭을 입력하고, 칩 내부의 레지스터 설정을 통해 100kHz의 샘플링을 수행하도록 하였다. ADC칩이 Master FSB 인터페이스로 동작하여 샘플링된 4채널의 데이터를 한 번에 송신하고, OMAP-L137이 제공하는 McASP 통신 포트를 Slave FSB 통신 프로토콜로 동작하도록 설정하여 데이터를 받는다.

3.5 데이터 취득 응용 동작 검증

장거리 모뎀 플랫폼을 이용한 데이터 취득 응용 구현에 대한 동작검증 결과에 대해 설명한다.

데이터 송신 기능 검증을 위해, 신호를 송신하면서 인터페이스보드의 송신 커넥터의 파형을 오실로스코프로 측정된 결과가 그림 20 있다. 그림에서 보듯이 DAC의 출력신호는 7.76Vpp로 측정이 되어 구현한 송신기능이 올바르게 동작하고 있음을 확인하였다. 출력 신호 범위가 최대 출력 신호 범위보다 작은 이유는 DAC로 전송한 송신 샘플 데이터를 최대 출력범위보다 약 5% 작은 범위에 있도록 설정하였기 때문이다.

송신과 수신 전환이 올바르게 동작하는지를 확인하기 위해 데이터 전송시작과 끝나는 부분에서 송/수신 제어신호의 동작을 측정된 결과가 그림 21에 있다. 그림에서 보면, 송신모드로 전환되고 약 20ms이후에 데이터 송신을 시작하고, 데이터 송신이 완료되면 약

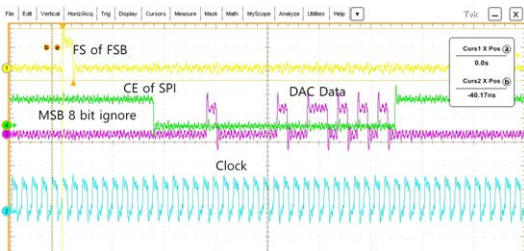


그림 19. DSP-FPGA-DAC간 DAC 데이터 전달
Fig. 19. DAC data sending among DSP, FPGA, DAC

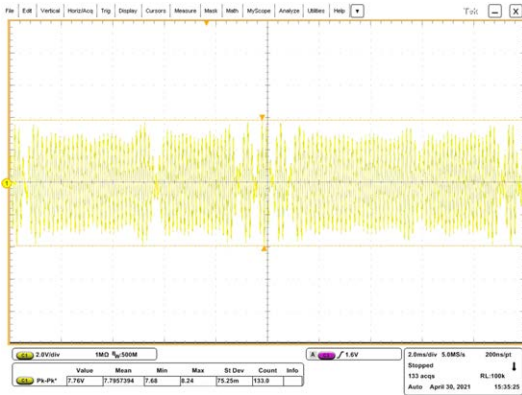


그림 20. DAC 출력 신호 측정
Fig. 20. Measurement of DAC output

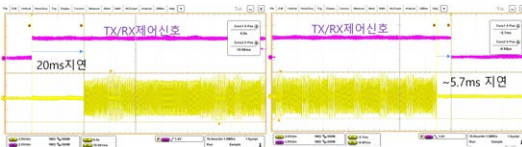


그림 21. 송/수신 제어신호 동작 측정
Fig. 21. Measurement of TX/RX control signal

5.7ms이후에 수신모드로 전환됨을 확인할 수 있다.

수신기능의 동작을 검증하기 위해 그림 15의 인터페이스결합보드 2셋을 연결하였다. 한 셋에서는 송신을 하고, 나머지 셋에서는 수신하여 동작을 확인하였다. GUI를 통하여 수신한 데이터는 그림 18과 같이 송신한 주파수 대역에서 송신신호의 파형이 관측됨을 확인하였다.

이상과 같이, 구현한 데이터 취득기능 검증을 통하여 구현한 장거리 수중통신 모뎀 플랫폼과 데이터 취득 응용프로그램이 올바르게 동작함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 장거리 수중통신 모뎀 개발을 위해 배열 음향 센서를 제작하고, 음향 센서를 구동할 수 있는 송신증폭기보드, 아날로그 신호처리보드, 주제어보드, FPGA보드, 인터페이스보드, 전원공급보드 등으로 구성된 플랫폼을 구현하였다. 제작한 배열 음향 센서는 수평방향으로는 무지향성 빔패턴을 가지며, 5kHz~8kHz대역에서 사용하기에 적합하도록 개발되었다. 송신 증폭기 보드는 하나의 보드에 두 채널신호를 증폭할 수 있어, 플랫폼에 2개의 보드를 사용하였다. 아날로그 신호처리 보드는 4개의 센서에서 수신된 신호를 증폭하고, 대역통과필터링한 신호를 ADC 변

환하는 기능과 송신 신호를 DAC변환하는 기능을 수행하도록 하였다. FPGA보드와 주제어보드는 플랫폼의 제어, 신호처리 및 플랫폼 외부와의 통신 등을 담당한다.

구현한 플랫폼의 기능을 확인하기 위해 구현한 플랫폼을 기반으로 데이터 취득 응용을 구현하였다. 데이터 취득 응용은 파일로 저장된 시험신호를 읽어 반복적으로 전송할 수 있는 송신기능과 4개의 배열 음향 센서에서 수신한 신호를 100kHz로 샘플링하여 데이터를 실시간으로 모니터링 및 파일로 저장할 수 있는 수신기능을 구현하였다. 데이터 취득 응용은 운용 GUI, 데이터 교환서버, 데이터 취득 DSP프로그램으로 구성된다. 운용 GUI는 사용자가 데이터 취득을 위해 플랫폼 동작을 제어 및 모니터링하고, 동작 파라미터를 설정할 수 있으며, 취득한 데이터를 파일로 저장할 수 있는 기능을 수행한다. 데이터 교환 서버는 운용 GUI와 데이터 취득 DSP간에 데이터 교환 및 명령 전달의 기능을 수행한다. 데이터 취득 DSP프로그램은 ADC/DAC 칩을 구동하여 신호를 송신하고, 수신한 신호를 취득하는 기능을 담당한다. 구현한 데이터 취득 응용을 통하여 구현한 장거리 수중통신모뎀 플랫폼이 올바르게 동작함을 검증하였다.

향후, 구현한 데이터 취득 응용을 이용하여 바다에서 실험역 데이터를 취득하여 장거리 수중통신모뎀 구현을 위한 신호처리 알고리즘 개발에 활용할 예정이다. 또한, 구현한 플랫폼에 실시간으로 동작하는 장거리 수중통신모뎀을 구현하고, 실험역에서 통신 기능 및 성능을 시험할 예정이다.

References

- [1] F. Campagnaro, R. Francescon, P. Casari, R. Diamant, and M. Zorzi, "Multimodal underwater networks: recent advances and a look ahead," *WUWNET: Int. Conf. Underwater Netw. & Syst.*, no. 4, pp. 1-8, Halifax NS, Canada, Nov. 2017.
- [2] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," *Ad Hoc Netw.*, vol. 3, no. 3, pp. 257-279, May 2005.
- [3] M. Stojanovic and J. Preisig, "Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 84-89, Jan. 2009.

- [4] L. M. Brekhovskikh and Y. P. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, Springer, New York, 3rd Ed., 2003.
- [5] *AD5754 Data sheet*, Retrieved Nov. 03., 2021, from https://www.analog.com/media/en/technicaldocumentation/data-sheets/AD5724_5734_5754.pdf.
- [6] *AD7768-4 Data Sheet*, Retrieved Nov. 03, 2021, from <https://www.analog.com/media/en/technicaldocumentation/data-sheets/AD7768-7768-4.pdf>.
- [7] *OMAP-L137 Low-Power Applications Processor Data Sheet*, Retrieved Nov. 03, 2021, from https://www.ti.com/lit/ds/symlink/omap-1137.pdf?ts=1635929383135&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOMAP-L137.
- [8] *McASP Design Guide - Tips, Tricks, and Practical Examples*, Retrieved Nov. 03, 2021, from <https://www.ti.com/lit/an/sprack0/sprack0.pdf?ts=1635882882536>.

김 승 근 (Seung-Geun Kim)



1995년 2월 : 인학대학교 전자공학과 졸업

1997년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 석사

2002년 8월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 박사

2002년 12월~현재 : 한국해양과학기술원부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원
<관심분야> 수중음향 통신 시스템 설계 및 구현, 동기 기술, 채널 등화기술 등

[ORCID:0000-0002-5957-4055]