

논문 2011-48CI-6-12

수중 환경 및 생태 실시간 모니터링을 위한 초소형 수중 음향통신 모뎀 개발

(Development of Underwater Acoustic Micro Modem for Real-Time Monitoring of Underwater Environment and Ecosystem)

전 준 호*, 박 성 준*

(Jun-Ho Jeon and Sung-Joon Park)

요 약

과거 유선 및 비실시간으로 구축되던 수중 생태 모니터링, 자원 탐사 시스템 등은 수중 무선 센서네트워크 시스템 기술의 연구 개발을 통해 실시간 정보 송수신이 가능한 디지털 융합의 형태로 진화될 수 있다. 이를 가능하게 하는 핵심 기술 중의 하나는 배터리에 의해 동작하는 초소형 수중 음향통신 모뎀 구현 기술이며, 본 연구에서는 무지향성 수중 음향 트랜스듀서를 탑재한 초소형 수중 음향통신 모뎀을 설계하고 개발한다. 또한, 구현된 수중 모뎀의 성능을 검증하기 위하여 경기도 양평의 북한강에서 송수신 실험을 수행하고 그 결과를 분석한다. 실험 결과에 따르면, 개발한 모뎀은 최대 250 m의 거리에서 200 bps의 전송속도와 7.8×10^{-5} 의 비트오율로 무선 데이터 송수신이 가능하였다. 개발된 수중 모뎀은 향후 수중 무선 센서네트워크를 활용한 다양한 응용 시스템에 적용 가능할 것으로 기대된다.

Abstract

Systems for underwater environment monitoring and natural resources can be considered as a part of digital convergence where real-time data transmission is possible with the help of underwater wireless sensor network (UWSN). One of key technologies required for the deployment of the systems is underwater acoustic micro modem. In this work, we design and implement an acoustic modem equipped with a commercial omnidirectional transducer. We also make experiments at the northern Han river for the verification of the developed modem. According to the experiments, the modem supports the working distance of 250 m and the data rate of 200 bps with a negligible bit error rate. It is expected that the acoustic modem can be used for various applications based on UWSN in a near future.

Keywords : Underwater wireless sensor networks, acoustic communications, acoustic modem, monitoring of underwater ecosystem

I. 서 론

수중 환경 생태 모니터링 및 자원 탐사를 수행하는 기존 방법으로는 다이버가 잠수하여 수중 정보를 취득하거나 유선으로 조종하는 수중 로봇, 혹은 무선으로 구동되는 수중 자율 로봇을 활용하는 방법들이 있다.

그러나, 다이버가 잠수하는 경우 작업 반경에 제한이 있으며 정보 전달에 있어 비실시간 특성을 갖게 된다. 또한, 수중 조종 로봇은 전원 및 통신을 위해 선으로 연결되어 있으므로 동작에 제한을 가지며 수중 자율 로봇은 무선으로 동작하나 정보 전송의 비실시간 특성을 갖는다. 이러한 고찰로부터 디지털 융합 시스템의 일환이며 현재의 방식들보다 진보된 무선 실시간 수중 환경 모니터링 기능을 제공하는 수중 무선 센서네트워크 시스템의 필요성이 제기되었다^{1~2)}.

수중 무선 센서네트워크의 근간이 되는 수중 통신에

* 정회원, 강릉원주대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering,
Gangneung-Wonju National University)

접수일자: 2011년10월10일, 수정완료일: 2011년11월2일

대한 연구 및 개발은 지난 수십 년 간 꾸준히 수행되었다. 그간 주로 고출력, 고가, 장거리 수중 모델에 국한되어 개발되었으나^[3~4], 최근 들어 수중 무선 센서네트워크에 적합한 수중 모델에 대한 연구의 필요성이 대두되면서 저출력, 소형 특성을 갖는 수중 모델 프로토타입들이 개발되었다^[5~6]. 또한, 본 연구팀은 선행 연구를 통해 70 kHz 대역을 사용하는 초소형 수중 모델을 연구 개발하고 검증한 바 있다^[7~8].

수중 채널에서 음파는 주파수가 낮을수록 더 멀리 전달되므로 본 논문에서는 26 kHz의 공진주파수를 갖는 상용 무지향성 트랜스듀서를 사용하여 초소형 수중 모델을 설계하고 구현한다. 부피를 최소화하기 위해 수중 모델의 기능을 디지털 처리, 아날로그 송신 처리, 아날로그 수신 처리로 분할하여 설계하고, 각 기능을 수행하는 총 3 종의 원형 보드를 실린더 형태로 적체하여 수중 모델을 완성한다. 또한, 구현된 수중 모델의 검증을 위해 북한강 수역에서 실증 실험을 실시하고 그 결과를 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 수중에서의 음파 전달 특성 및 트랜스듀서의 동작에 대해 상술하고, III장에서 개발하는 수중 음향 모델의 상세 구성에 대해 설명한다. IV장에서 구현한 수중 모델의 검증을 위한 실험 환경에 대해 논하고 수행한 실험 결과를 분석한 후 V장에서 결론을 제시한다.

II. 수중 통신에서의 음파 전달

1. 수중 채널에서 음파의 전달 특성

음파는 수중에서 전달특성이 우수하다는 장점에 일반적으로 수중 통신의 반송파로 사용된다. 수중에서 음파의 전달 속도는 약 1,500 m/s로 전파의 전달 속도인 $3 \cdot 10^8$ m/s와 비교했을 때 현저히 낮으며, 이로 인해 수중에서 음파는 심한 전달 지연 및 다중경로에 의한 신호 간섭이 발생하게 된다. 또한, 음파는 이 외에도 주파수, 염도, 수심, 온도, 산성도 등의 변화에 따라 신호의 전달 특성이 달라지는 특성을 가지고 있다.

일반적으로 해수면이나 내수면의 수중 채널은 모두 수직 방향보다는 수평방향으로 넓게 분포되어 있다. 따라서 음파가 수중 채널을 통해 전달될 때 대부분의 다중경로신호는 그림 1에서와 같이 수표면과 해저면에서의 연속적인 반사에 의해 발생된다. 그림 1은 음파가 송신기에서 수신기로 전달될 때 직선경로 신호인 A뿐

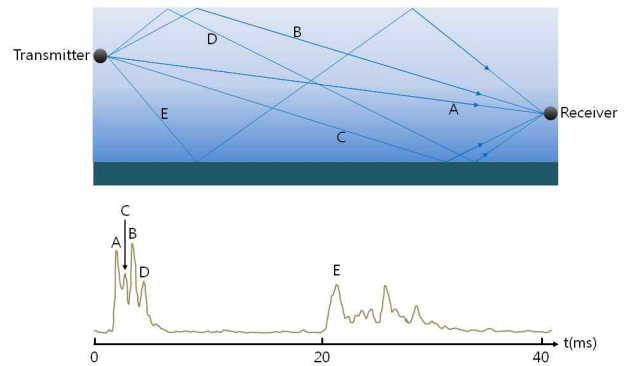


그림 1. 음파의 다중경로 페이딩
Fig. 1. Multipath fading of acoustic wave.

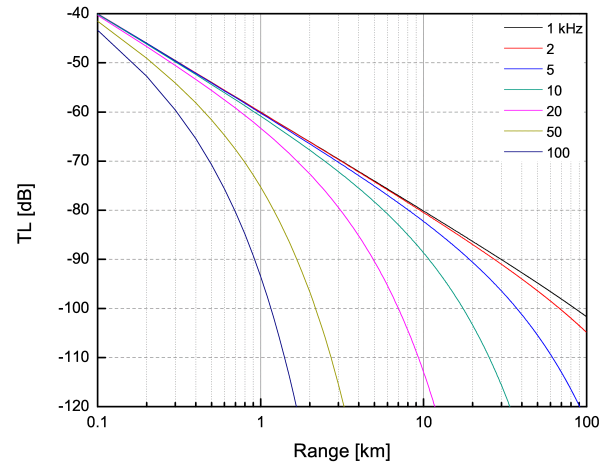


그림 2. 주파수에 따른 전달 손실
Fig. 2. Transmission loss with respect to operating frequencies.

만 아니라 다중경로 신호 B, C, D, E에 의한 반향의 발생으로 신호 변형이 일어나는 것을 보여준다.

수중에서 음파의 전달 손실(TL: transmission loss)은 흡음 및 확산에 의해 발생한다. 전달 손실의 특성은 수식 (1)로 나타낼 수 있는데, 여기서 d 는 전달 거리를 a 는 흡음 계수를 의미한다^[9].

$$TL = 20 \log(d) + \alpha d \tag{1}$$

흡음에 영향을 미치는 요소로는 위에서 언급한 주파수, 염도, 수심, 온도, 산성도 등이 있으며 이 중 주파수의 변화가 가장 큰 영향을 미친다. 그림 2는 주파수에 따른 전달 손실의 변화 그래프이며 낮은 주파수를 사용할수록 전달 손실이 감소한다는 것을 알 수 있다.

2. 수중 음향 트랜스듀서

수중 음향 트랜스듀서는 전기 신호를 음향 신호로

또는 음향 신호를 전기 신호로 변환하는 역할을 수행한다.

음파를 방사하는 형태에 따라 음향 트랜스듀서는 지향성 트랜스듀서와 무지향성 트랜스듀서로 분류할 수 있는데, 트랜스듀서의 내부 결정 구조 및 제조 공정에 따라 음파의 방사 형태가 결정된다. 지향성 트랜스듀서는 음파의 방사 형태를 특정한 방향으로 제한하여 에너지를 집중해 음파를 전달하므로 에너지 효율이 높다는 장점을 갖는다. 그러나 음파가 방사되는 방향이 제한되는 만큼 상호 통신하는 트랜스듀서가 서로 마주보고 있어야 송수신 성능을 높일 수 있다. 반면, 무지향성 트랜스듀서는 전 방향으로 음파가 방사되므로 방향에 구애받지 않지만 방사 에너지가 전 방향으로 확산되므로 음파의 전달 거리가 상대적으로 짧아지게 된다.

따라서 수중 센서 네트워크 시스템에서 고정된 노드 또는 센서노드를 지원하기 위해서는 지향성 트랜스듀서를 사용하는 것이 유리하며, 싱크노드 또는 이동성이 고려된 노드를 지원하는 경우라면 무지향성 트랜스듀서를 사용하는 것이 적합하다. 본 논문에서는 수중 무선 센서네트워크의 모든 노드에서 활용될 수 있도록 무지향성 음향 트랜스듀서를 사용하여 수중 모뎀 연구를 수행하였다.

그림 3은 본 연구에서 사용한 무지향성 수중 음향 트랜스듀서를 나타내었다. 표 1은 사용한 트랜스듀서의 상세 규격으로, 비교적 전달 손실이 적은 26 kHz의 낮은 공진 주파수와 무지향 방사 형태를 가지며 송신 감도(TRV)와 수신 감도(RR)는 각각 147 dB re 1 uPa/V at 1 m와 -200 dB re 1 V/uPa이다.

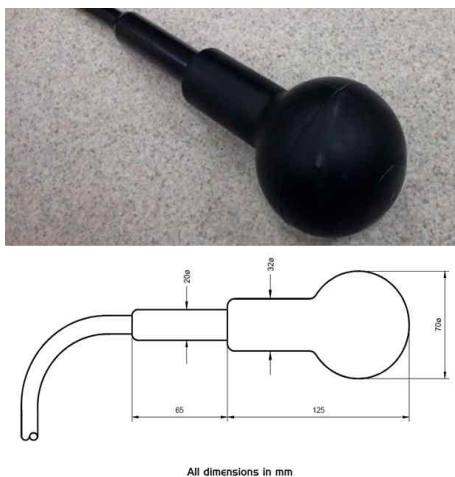


그림 3. 무지향성 수중 음향 트랜스듀서
Fig. 3. Omnidirectional underwater acoustic transducer.

표 1. 수중 음향 트랜스듀서 특성
Table 1. Features of underwater acoustic transducer.

특성	설명
공진 주파수	26 kHz
방사 형태	무지향
송신 감도	147 dB re 1 uPa/V at 1 m
수신 감도	-200 dB re 1 V/uPa

수식 (2)~(4)는 소나 방정식^[10]으로 수중 음향 트랜스듀서의 송신 감도, 수신 감도 등을 대입하여 수중 모뎀의 송수신 특성을 예측할 수 있다. 여기서, SPL_T 와 SPL_R 는 각각 송신 음압과 수신 음압의 레벨을, V_{input} 과 V_{output} 은 각각 송신 수중모뎀의 트랜스듀서에 가한 입력 전압과 수신 수중모뎀의 트랜스듀서에 출력되는 수신 전압을 나타낸다.

$$SPL_T = TRV + 20 \log V_{input} \quad (2)$$

$$SPL_R = SPL_T - 20 \log d - \alpha d \quad (3)$$

$$20 \log V_{output} = SPL_R + RR \quad (4)$$

III. 수중 음향 모뎀

1. 수중 음향 모뎀 개요

수중 무선 센서네트워크에 활용될 수중 음향 모뎀의 요구사항으로는 낮은 전력 소모와 소형화 설계 등이 있다. 즉, 배치된 수중 모뎀은 수거 및 채종전이 용이하지 않으므로 저전력 구동을 통해 동작시간을 최대화해야 하고, 수중 음향 모뎀을 탑재한 수중 노드 또는 수중 이동체의 이동을 원활히 하고 수중 생태계에 영향을 주지 않기 위해서는 모뎀을 소형화해야 한다. 이에 본 연구에서는 선행 연구^[6~8]들을 기반으로 상기 수중 무선 센서네트워크 시스템을 위한 수중 음향 모뎀의 요구사항을 반영한 초소형 크기와 저전력 특성을 갖는 모뎀을 설계하고 구현하였다.

그림 4와 표 2에 수중 음향 모뎀의 하드웨어 외형 및 사양을 각각 나타내었다. 모뎀은 원형 다층 구조로 각각의 층을 기능별로 분할하여 설계되었고, 지름 70 mm와 높이 35 mm의 크기로 모뎀을 구현함으로써 소형화하였다. 그림 4의 (a), (b), (c)는 각각 디지털 보드, 송신 아날로그 보드, 수신 아날로그 보드를 나타낸다. 모뎀 구동을 위한 프로세서로는 ARM Cortex-M3 코어를

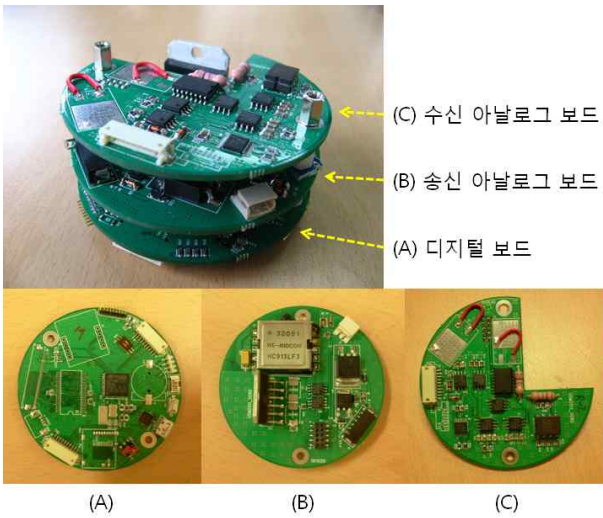


그림 4. 수중 음향 모듈 하드웨어
Fig. 4. Hardware of underwater acoustic modem.

표 2. 수중 음향 모듈 사양
Table 2. Specification of underwater acoustic modem.

특성	설명
크기	70 mm × 35 mm (Ø × H)
마이크로프로세서 (코어)	STM32F103ZE (ARM Cortex-M3)
인터페이스	SPI, UART
배터리	±14.8 V Li-ion
최대 소모 전력	4.5 W

사용하는 STM32F103ZE 칩을 사용하였으며 상위 계층과의 연동을 위해 SPI(serial peripheral interface)와 UART(universal asynchronous receiver transmitter) 통신 인터페이스를 구성하였다. 또한 모듈 동작을 위한 배터리로 ±14.8 V 리튬 이온 배터리를 사용하였으며, 최대 4.5 W의 전력을 소모한다.

2. 디지털 보드

디지털 보드는 모듈의 전체적인 동작을 제어하는 프로세서를 중심으로 설계되었다. 본 구현에 사용한 STM32F103ZE 프로세서는 ARM Cortex-M3 코어 및 다양한 주변장치가 내장되어 있어 소형화를 실현하는데 적합하며 최대 72 MHz의 클럭 속도를 지원한다. 또한, 주변 기기와의 연동을 위해 SPI, UART 포트가 장착되어 있고 내장된 DAC(digital-to-analog converter)와 ADC(analog-to-digital converter)를 이용하여 아날로그 장치와의 연동이 가능하다. 한편, 송신 아날로그 보드로부터 공급받는 12 V의 전원으로부터 3.3 V의 프로

세서 구동 전원을 획득하기 위하여 디지털 보드에 레귤레이터를 설계하고 탑재하였다. 또한, 타 보드 및 시스템과의 연동을 위해 SPI와 UART 포트의 커넥터를 부착하였다.

3. 송신 아날로그 보드

송신 아날로그 보드는 크게 대역통과필터, 증폭기, 레귤레이터로 구성하였다. 디지털 보드의 DAC와의 연결 시 신호의 왜곡을 없애기 위해 버퍼 및 대역통과필터를 구현하였고, 트랜스듀서로 전달되는 아날로그 신호의 출력을 증대시키기 위해 고출력 증폭기를 설계하였다. 또한, 외부 배터리에서 공급받는 ±14.8 V의 전원을 ±12 V로 변환하기 위한 레귤레이터를 설계, 장착하였다. 레귤레이터에서 출력되는 전원은 송신 아날로그 보드 및 수신 아날로그 보드의 증폭기, 필터 등의 구동을 위해 사용되고 디지털 보드에 전원을 공급하기 위해 사용된다.

4. 수신 아날로그 보드

수신 아날로그 보드는 수신신호세기 제한기, 증폭기, 대역통과필터, 이득 조절기, 포락선 검출기로 구성된다. 수신신호세기 제한기는 증폭기에 과도한 전압이 인가되는 것을 차단하는 역할을 수행한다. 증폭기는 음향 트랜스듀서로부터 수신된 작은 신호를 가공이 용이한 크기의 신호로 변환한다. 대역통과필터는 외부 잡음에 의한 오류 발생을 줄이기 위해 설계되었으며, 프로세서의 제어를 통해 동작하는 이득 조절기가 장착되었다. 또한 디지털 보드에 입력될 최종 신호를 생성하는 포락선 검출기가 구현되었다.

5. 데이터 전송 과정

모뎀 데이터 송신 과정은 다음과 같다. 상위 계층으로부터 SPI 혹은 UART를 통해 데이터를 수신한 디지털 보드는 송신모드로 전환되어 데이터 전송 프레임을 생성한다. 이후 DAC를 거쳐 26 kHz의 정현파가 발생된다. 이 때, 심볼 당 신호 발생 시간은 수중 음향 트랜스듀서의 특성을 고려하여 약 0.2 ms로 설정하였다. 심볼 당 발생시간은 실험을 통해 수중 음향 트랜스듀서가 정상 상태까지 도달하는 시간(과도 응답)이 약 0.15 ms임을 검증하여 설정하였다. DAC에서 발생된 신호는 송신 아날로그 보드의 증폭기로 전달되어 최대 200 V_{p-p}의 크기로 증폭된다. 송신 아날로그 보드 증폭기의 최대 출력 값은 디지털 보드의 DAC 출력 값에 의해 제어

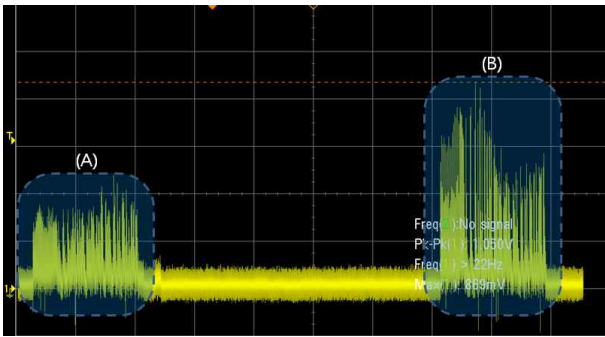


그림 5. 수신 신호 파형
Fig. 5. Snapshot of received signal.

될 수 있다. 증폭된 신호는 수중 음향 트랜스듀서를 통과하면서 음파로 변환되어 송출된 후 송신 과정을 종료하고 디지털 보드는 수신 모드로 전환되어 데이터 수신 상태로 대기하게 된다.

데이터 수신 과정은 트랜스듀서에서 음향 신호를 수신하면서 시작된다. 트랜스듀서에서 변환되어진 전기 신호의 세기는 매우 미약하므로 수신 아날로그 보드의 증폭기를 통해 증폭하고, 수중 채널을 통해 전달되는 동안 발생한 잡음 신호를 제거하기 위해 대역통과필터를 통과시킨다. 그 후, 포락선 검출기를 통해 수신 신호 처리가 용이한 형태로 파형이 변환되고 디지털 보드로 신호를 전달하기 위해 신호 레벨을 3.3 V 이하로 조정된다. 디지털 보드로 전달된 신호는 ADC를 거쳐 디지털 신호로 변환되고 신호처리 과정을 거치게 되는데 이를 상술하면 다음과 같다. 그림 5는 디지털 보드로 입력되는 수신 신호의 파형이며 (A), (B)는 연이어 수신한 두 개의 전송 프레임을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 (A) 프레임의 경우 비교적 일정한 크기의 신호가 수신되었지만 (B) 프레임의 파형은 변동 폭이 크다. 또한, (A)와 (B)의 전체적인 수신 신호의 크기도 차이가 있다. 이러한 파형 변화는 수중 채널의 시변 특성 때문에 발생하며, 본 연구에서는 상기 환경에서의 전송오율을 줄이기 위해 심볼을 판단하는 기준 전압을 심볼 간의 최대치를 비교하여 매 심볼마다 가변 기준을 적용하는 방법을 사용하였다. 최종적으로, 디지털 보드는 추출한 데이터를 상위계층으로 전달함으로써 수신 과정을 종료한다.

IV. 실험

본 연구에서 개발한 수중 음향 모뎀의 성능을 검증하

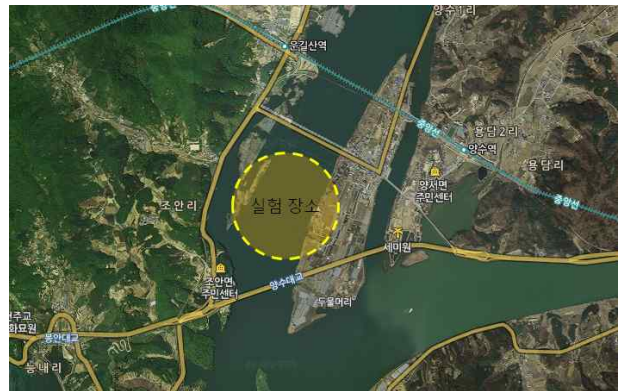


그림 6. 실험 장소
Fig. 6. Test site.

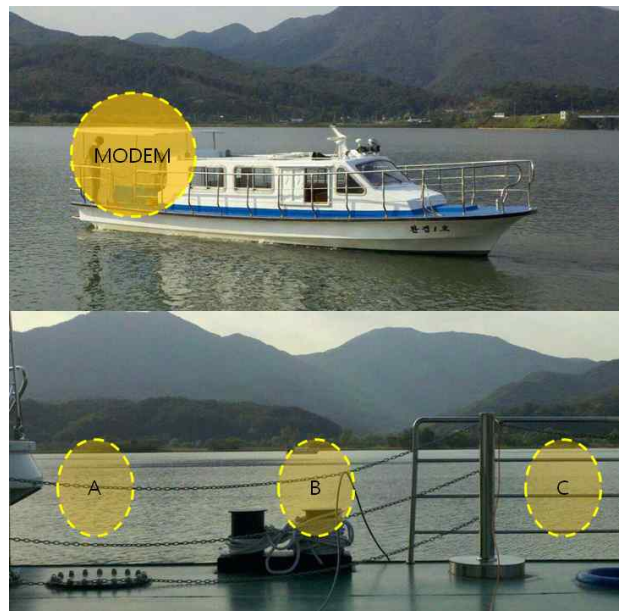


그림 7. 실험 환경
Fig. 7. Experimental environment.

기 위해 그림 6에 나타난 경기도 양평군 양서면 양수리에 위치한 북한강 수역에서 실증 실험을 수행하였다. 해당 위치에서의 수심은 약 7~8 m, 유속은 0.1 m/s이었다.

그림 7에 나타난 바와 같이 선박을 이용하여 거리를 늘려가면서 각각의 거리에 대해 전송 속도를 변경하는 방법으로 실험을 진행하였고, 선박에 배치한 송신 모뎀에서 미리 지정된 데이터를 주기적으로 송신하고 선착장 인근에 위치한 수신 모뎀에서 수신한 데이터를 그림 8에 나타난 컴퓨터 모니터링 화면을 통해 확인하였다. 각 실험 환경에서 비트오율(bit error rate, BER)을 획득하기 위해 128 비트의 정보 데이터를 포함하고 있는 프레임을 100회 반복 전송한 후 수신한 데이터의 오류

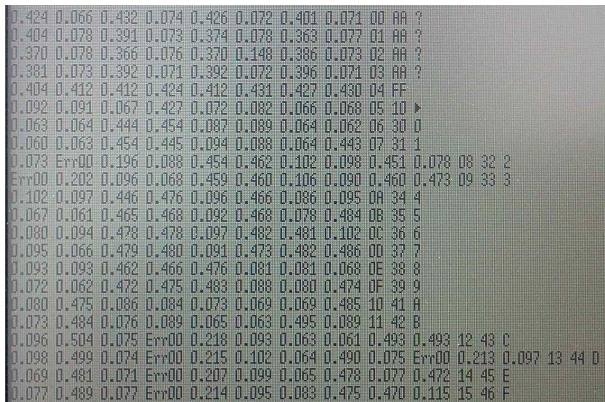


그림 8. 수신 데이터 모니터링 화면
Fig. 8. Screen capture of received data.

표 3. 비트오율 측정 결과
표 3. Experimental results of BER.

전송 거리 \ 전송 속도	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m
50 bps	7.8×10^{-5}	7.8×10^{-5}	7.8×10^{-5}	7.8×10^{-5}	7.8×10^{-5}
100 bps	7.8×10^{-5}	5.5×10^{-4}	7.8×10^{-4}	7.8×10^{-5}	7.8×10^{-5}
150 bps	7.8×10^{-5}	3.3×10^{-3}	2.8×10^{-3}	7.8×10^{-5}	1.1×10^{-3}
200 bps	7.8×10^{-4}	4.9×10^{-3}	1.6×10^{-3}	7.8×10^{-5}	1.6×10^{-4}

표 4. 수신 모뎀 위치에 따른 비트오율 측정 결과
표 4. Experimental results of BER with respect to receiving modem sites.

수신 위치	A	B	C
비트오율	7.8×10^{-5}	1.2×10^{-2}	7.8×10^{-5}

율을 계산하였다.

실험을 통해 획득한 비트오율 측정 결과를 표 3과 표 4에 나타내었다.

표 3은 50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 250 m의 거리에서 각각 전송 속도를 50 bps, 100 bps, 150 bps, 200 bps로 변경하면서 유속과 동일하게 선박이 떠내려가며 실측된 비트오율 결과이다. 전송 거리가 짧거나 전송 속도가 낮을 때에는 거의 오류 없는 통신이 가능하였으나, 거리 및 속도가 증가함에 따라 비트오율이 서서히 증가하였다. 한편, 200 m 전송 거리에서는 다른 전송 거리와는 달리 매우 낮은 비트오율을 획득하였다. 이는, 200 m가 강의 중간 지점에 해당하고 이 지점에서 수심이 가장 깊어 다중경로에 의한 수신 성능 저하가 덜 발생한 것으로 분석할 수 있다.

표 4는 수신 모뎀의 위치에 따른 비트오율을 측정된 결과로 전송 거리 250 m, 전송속도 200 bps로 고정하고 실험을 실시하였다. 실험 결과, 수신 모뎀이 B 지점에 위치하였을 때 수신 성능이 급격히 감소함을 확인할 수 있었으며 이를 통해 수중 통신은 수중의 지형적 구조 및 장애물에 크게 영향을 받음을 유추할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 수중 환경 생태 모니터링 시스템을 위한 초소형 수중 음향 통신 모뎀의 개발을 수행하였다. 개발된 모뎀은 부피를 최소화하기 위해 원형 다층 구조로 설계하였고 26 kHz의 공진 주파수를 갖는 무지향성 트랜스듀서를 탑재하였다. 또한, 북한강 유역에서 배를 이용하여 구현한 수중 모뎀의 실증 실험을 수행하였으며 전송 거리, 전송 속도, 수중 환경에 따른 모뎀의 수신 성능을 검증하였다. 실험 결과에 따르면, 250 m의 전송 거리와 200 bps의 전송 속도에서 약 10^{-4} 의 비트오율로 무선 데이터 송수신이 가능하였다.

본 연구를 통해 개발한 초소형 수중 모뎀은 향후 디지털 및 아날로그부 개선을 통해 수중 무선 음향 통신에 기반한 수중 무선 센서네트워크의 다양한 응용 시스템에 활용할 수 있을 것으로 기대되며, 이러한 수중 무선 센서네트워크 시스템은 지상 무선 통신 시스템과 실시간으로 연동되어 수중과 지상 간 디지털 융합을 촉진시킬 것으로 예상된다.

감 사 의 글

이 논문은 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(NIPA-2011-C1090-1121-0001)과 2011년도 정부(교육과학기술부) 재원의 한국연구재단 기초연구사업(2011-0013928)의 연구결과로 수행되었음.

실험 환경을 제공해 주신 한강물환경연구소 관계자 및 김상섭 님께 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

[1] 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.

[2] J. H. Cui, J. Kong, M. Gerla and S. Zhou, "Challenges: Building scalable and distributed underwater wireless sensor networks (UWSNs) for Auqatic Application," *UCONN CSE Technical Report*, Jan. 2005.

[3] Teledyne Benthos, Inc., <http://www.teledynebenthos.com>

[4] LinkQuest, Inc., <http://www.link-quest.com>

[5] S. Pandya, J. Engel, J. Chen, Z. Fan and C. Liu, "CORAL: miniature acoustic communication subsystem architecture for underwater wireless sensor networks," in Proc. *IEEE Sensors*, Irvine, CA, pp. 163-166, Oct. 2005.

[6] Moo-Kwang Byeon, Bo-Won Kim, Jun-Ho Jeon and Sung-Joon Park, "Design and implementation of high-speed communication modem using ultrasonic sensors for underwater sensor networks," in Proc. *MTS/IEEE OCEANS 2008*, Quebec, Canada, Sep. 2008.

[7] 전준호, 조현철, 김창화, 류영선, 박성준, "수중 음향 통신을 위한 초소형 모뎀 설계 및 구현," *한국통신학회 논문지*, 36권 4호, 2011년 4월.

[8] Jun-Ho Jeon, Tae-Hee Won, Hunchul Cho and Sung-Joon Park, "Implementation of a micro-modem for underwater wireless sensor networks," in Proc. *MTS/IEEE OCEANS 2011*, Santander, Spain, Jun. 2011.

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

[10] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, 4th ed.

저 자 소 개



전 준 호(정회원)
 2007년 2월 강릉원주대학교 전자공학과 학사 졸업.
 2009년 2월 강릉원주대학교 전자공학과 석사 졸업.
 2009년~현재 강릉원주대학교 ITRC 전임연구원.

<주관심분야 : 수중 음향통신, 수중 모뎀 설계 및 구현, 무선 센서네트워크시스템>



박 성 준(정회원)
 1996년 2월 연세대학교 전자공학과 학사 졸업.
 1998년 2월 한국과학기술원 전기 및전자공학과 석사 졸업.
 2004년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 박사 졸업.

2003년 9월~2005년 3월 삼성전자 정보통신 연구소 책임연구원.

2005년 4월~현재 강릉원주대학교 전자공학과 부교수.

<주관심분야 : 무선 통신, 수중 음향통신, 통신 시스템 설계 및 구현, 무선 센서네트워크시스템>