

수중 센서네트워크를 위한 초음파 통신 모뎀 설계 및 구현

최회원 변 무 광*, 종신회원 박 성 준*

Design and Implementation of an Ultrasonic Communication Modem for Underwater Sensor Networks

Moo-Kwang Byeon* *Regular Member*, Sung-Joon Park* *Lifelong Member*

요 약

최근 해양개발 및 재난·재해 방지 시스템에 대한 관심이 높아지면서 수중 센서네트워크 관련 연구가 시작되고 있으며, 다수의 노드 간 효율적인 통신을 위해 고속, 저가의 수중 통신 모뎀의 필요성이 증대되고 있다. 본 논문에서는 저가의 초음파 센서를 이용하여 수중 통신 모뎀을 설계 및 구현하였고 실내와 실외 환경에서 구현한 모뎀의 성능을 검증하였다. 실험 결과에 의하면, 개발한 모뎀은 실내의 수조에서 1.5kbps, 연못에서 2kbps로 통신이 가능하였으며 모뎀 간의 최대 통신 거리는 30m이었다. 또한, 수중 센서네트워크의 기능 구현을 고려하여 싱크노드용 모뎀과 센서노드용 모뎀들 간의 일대다 통신 실험을 수행하였다.

Key Words : Underwater Wireless Sensor Networks; Underwater Communication ; Acoustic Modem.

ABSTRACT

Underwater sensor networks (USN) for ocean development and disaster prevention have been emerged as one of interesting research topics recently. Since a high-speed and inexpensive communication modem is a prerequisite for deployment of USN, we design and implement an underwater modem by utilizing general-purpose waterproof ultrasonic sensors in this paper. We also make experiments in indoor and outdoor environment with two modems facing each other to conduct a point-to-point communication. According to the experiments, we can achieve the data rates of 1.5 kbps in a water tank and 2 kbps in a pond. Also, the maximum communication distance between two modems is about 30 meters. Besides, we conduct a point-to-multipoint experiment imitating USN by deploying a gateway, a sink node and three sensor nodes in a water tank.

1. 서 론

바다는 식량, 광물, 에너지원 등 천연 자원의 보고이므로 해양 자원 개발에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. 특히, 최근에는 해양 환경 모니터링, 재난 재해 방지 시스템 구축 및 군사적인 목적으로 무선 수중 센서네트워크에 대한 관심이 증대되고 있는 상황이다.

지상의 무선 통신을 위한 반송파로 사용되는 전파(radio frequency)는 수중 채널에서 흡수 및 산란되기 쉽고 전달 손실이 크기 때문에 수중 통신에 적합하지 않다. 일반적으로 수중 무선 통신을 위한 반송파로 초음파를 사용하는데, 초음파의 속도는 전파의 속도에 비해 매우 느려 데이터 전송 지연 시간이 길고 대역폭이 한정되어 있어 전송 속도가 낮은 특징을 갖는다.

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 2009년도 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2009-C1090-0902-0044)

* 강릉원주대학교 전자공학과 무선통신연구실(bmk@ultra30.kangnung.ac.kr)(psj@icee.org)

논문번호 : KICS2009-03-124, 접수일자 : 2009년 3월 20일, 최종논문접수일자 : 2009년 5월 25일

수중 무선 통신에 대한 선행 연구 및 개발은 해양 지원 채취, 수중 이동 체계 및 심해 탐사 등을 위한 고가의 고출력 수중 모델에 대해 집중적으로 수행되어 왔다^{[1], [2]}. 그러나, 다수의 센서노드(sensor node)를 필요로 하는 수중 센서네트워크 시스템의 경우 기개발된 상용 고출력 모델을 적용하기에는 전력 및 비용 면에서 효율성이 떨어진다. 이에 최근 [3], [4], [5]의 논문에서 저전력으로 동작하는 수중 모델의 필요성이 대두되었으며, [6], [7] 등의 초기 연구를 통해 저전력 초음파 노드가 구현된 바 있다. 그러나, [6]에서 제안된 음향 모델은 송·수신을 위한 트랜스듀서로 각각 스피커와 마이크를 사용하였으며 통신 환경을 지상에 국한하였기에 수중 통신에 적용하기에는 부적합하다. 한편, [7]에서는 마이크로컨트롤러(microcontroller unit, MCU) 기반으로 제작한 CORAL이라는 하드웨어를 이용하여 수중 통신 실험을 수행하였으나, 통신 거리가 20 cm에 불과하였고 전송 속도와 비트 오류에 대한 구체적인 결과는 제시되지 않았다.

본 논문은 [8]의 연구를 기반으로 8-bit MCU와 저가의 범용 초음파 센서를 이용하여 고속 수중 통신모형을 설계, 구현하고 다양한 환경에서 일대일 통신 실험을 수행하여 모델의 성능을 확인한다. 또한, 소규모 네트워크를 구성하여 개발한 모델의 일대다 통신 가능 여부를 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 초음파 통신 모델의 설계 및 구현 방법과 송·수신 신호처리에 대해 논하고, III장에서는 프레임 포맷(frame format)에 대하여 설명한다. IV장에서 실내·외 실험 결과를 비교, 분석하고, V장에서 결론 및 향후 연구를 제시한다.

II. 통신 모델 설계 및 구현

2.1 하드웨어

수중 초음파 통신 모델 구현에 적용된 하드웨어

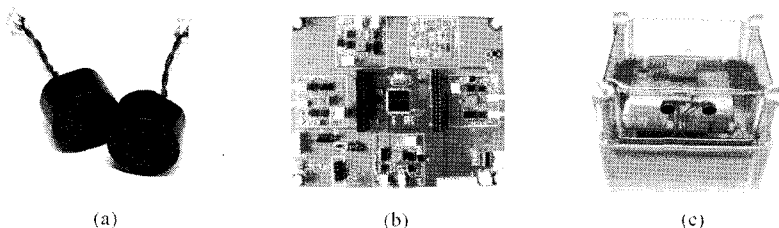


그림 1. 초음파 센서 및 하드웨어

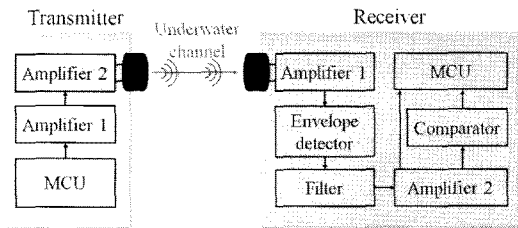


그림 2. 블록다이어그램

는 그림 1에 제시되어 있다. 그림 1의 (a), (b), (c)는 각각 초음파 센서, 제작된 모델 하드웨어, 방수 처리된 모델의 외형을 나타내고 있다. 그림 1 (a)의 초음파 센서는 자동차 후방 감지 및 거리 측정 용도로 널리 사용되고 있는 저가의 방적형(防滴形) 센서로 모델의 트랜스듀서로 사용되었다. 상기 초음파 센서는 수중에서 30 kHz의 주파수로 동작하며, 가로, 세로 각각 110°, 50°의 방향성을 갖는다. 모델 제어를 위한 MCU로는 ATmega128, 모델 동작을 위한 전원으로는 12V 연축전지가 사용되었다. 각 모델은 노드 간 양방향 통신을 위해 그림 1 (c)와 같이 한 쌍의 송수신 분리형 센서를 갖는다.

그림 2는 구현된 모델의 전체적인 구조를 간략히 도시한 블록다이어그램이며, 정보 전송 과정은 다음과 같다. 송신부에서 전송하고자 하는 이진 데이터를 MCU에서 변조시킨 후 증폭기를 거쳐 초음파 센서를 통해 수중으로 출력한다. 수신부의 초음파 센서에 입력된 신호는 수중채널의 영향으로 신호의 세기가 감소, 왜곡되어 있으며 1차 증폭기, 포락선 검파기, 필터, 2차 증폭기 및 비교기를 거쳐 MCU에 전달된다. MCU는 입력된 신호에 대해 샘플링을 수행한 후 최종적으로 이진 데이터를 추출한다.

2.2 송신부

모델간의 통신에 적용된 변조 기법은 MCU의 연산 처리 능력을 고려하여 비교적 수신 신호처리가 용이한 이진 진폭편이변조(binary amplitude shift keying)를 채택하였으며, 반송파 주파수(f_c)는 30kHz를 사

용하였다. 즉, 전송 비트가 1인 경우, 일정 시간동안 초음파 센서에 30kHz의 정현파를 출력하고, 전송 비트가 0인 경우에는 신호를 출력하지 않도록 설계하였다. 상기 주파수는 구현에 사용된 센서의 수중전달 특성이 최대화되는 주파수를 실험을 통해 찾은 것이며, 특성이 다른 초음파 센서를 트랜스듀서로 사용할 경우 센서 특성에 맞게 주파수를 조정해야 한다.

다중경로 환경에서 심볼 간 간섭으로 인해 발생할 수 있는 데이터 전송 오류를 줄이기 위해 송신부의 전송 심볼을 그림 3과 같이 구성하였다. T_1 은 심볼 주기를 나타내며, 변조구간인 T_2 동안 변조 신호를 송출한 후 T_3 만큼의 보호구간을 둬으로써 잔향 및 다중경로 페이딩(multi-path fading)으로부터 변조 신호를 보호한다. 채널 환경이 좋을 경우 보호구간 T_3 를 줄일 수 있으며, 이것은 전송 속도의 향

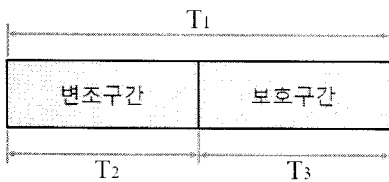


그림 3. 전송 심볼 구성

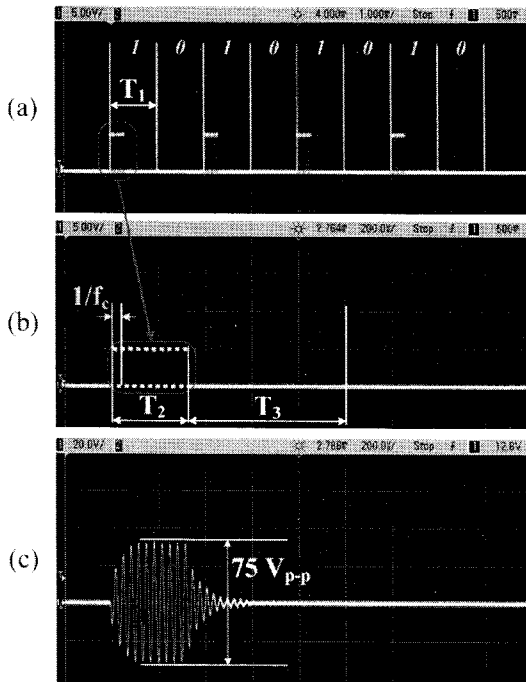


그림 4. 송신부의 신호처리

상을 의미한다.

그림 4는 송신 신호처리의 예로 16진수 0xAA의 1 바이트 데이터를 1kbps로 전송하는 경우의 신호 처리 과정을 나타내고 있다. 그림 4의 (a)는 MCU의 출력 전압을 오실로스코프로 측정한 파형이며, (b)는 (a)의 신호를 시간 축으로 5배 확대한 파형이다. 여기서, T_1 은 심볼 주기, T_2 는 변조구간, T_3 는 보호구간을 의미하며, f_s 는 30 kHz로 고정된 반송파 주파수를 나타낸다. 본 예에서는 변조구간 T_2 를 심볼 구간 T_1 의 1/3로 설정하였는데, 4장에서 분석하였듯이 이는 통신 환경에 따라 데이터 전송 속도 및 통신 거리에 영향을 미치는 중요한 파라미터가 된다. 그림 4의 (c)는 최종적으로 송신 센서에 인가되는 신호의 파형으로 변조 및 증폭을 통해 신호 레벨이 크게 증가되었다.

2.3 수신부

그림 5는 수신부의 신호처리 과정을 나타내는 것으로 각 파형은 수신 회로의 특정 위치에서 출력 전압을 측정한 것이다. 그림 5의 (a)는 수중 채널을 통해 전송된 초음파 신호가 수신 센서에 의해 전기적인 신호로 변환된 파형을 나타내고 있으며, (b)는 1차 증폭기에 의해 증폭된 신호이다. 여기서, 송신 신호로 판단되는 신호 뒤에 채널 환경에 의한 잡음 및 다중경로 페이딩 신호가 보호구간에서 발생되었음을 관찰할 수 있다. 그림 5의 (c)는 포락선 검파기의 출력 신호로 1차 증폭기의 출력 신호 중 고주

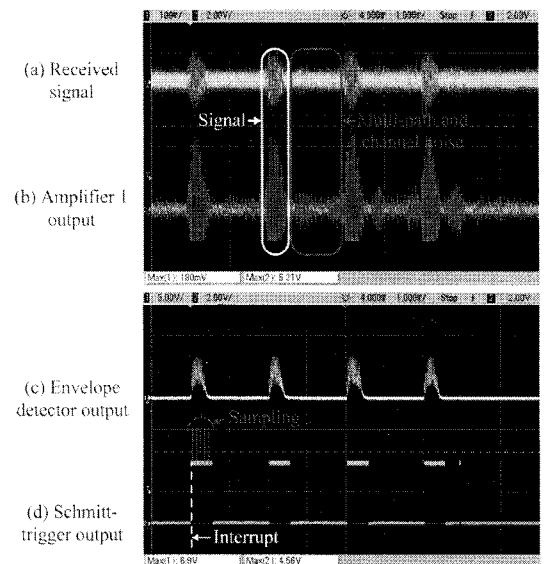


그림 5. 수신부의 신호처리

과 성분과 미세한 채널 잡음 신호가 제거된 신호 파형을 나타내고 있다. 포락선 검파기의 출력 신호를 필터에 통과시켜 추가적으로 잡음 성분을 제거하고, 2차 증폭기에서 소폭 증폭시킨다. 생성한 신호는 비교기 및 MCU의 아날로그-디지털 변환기(analog-to-digital converter, ADC)의 입력으로 인가되는데, ADC에 의해 측정된 신호의 전압 값은 수신 신호의 세기로 대변될 수 있으며 이는 모뎀 간의 거리 또는 채널 상태 추정을 위한 지표로 활용될 수 있다. 또한, 추후 상기 2차 증폭기의 증폭비와 수신 신호 세기를 연계시켜 자동 이득 조정 장치(auto gain controller, AGC)를 구현할 경우 유연하고 신뢰도 높은 신호처리를 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 그림 5의 (d)는 비교기의 출력 파형으로 슈미트트리거 소자의 히스테리시스에 의해 이진 레벨 신호로 변환된 파형을 나타내고 있다. 이 신호는 MCU의 인터럽트 핀에 연결되어 있으며, 데이터 패킷의 최초 상승 엣지가 입력되면 MCU에 인터럽트를 발생시켜 수신 신호에 대한 샘플링을 시작시킨다. 샘플링은 최초 인터럽트가 발생된 이후 50us 간격으로 3회 내지 11회 수행하며, 매 심볼 주기마다 동일한 방법으로 샘플링을 반복 수행한다. 최종적으로 샘플링된 값들에 대해 다수 판정(majority voting)을 수행함으로써 수신 비트를 0 또는 1로 결정한다.

III. 프레임 포맷

모뎀간의 계층적 통신을 위한 프레임 포맷을 그림 6에 제시하였다. 프레임 앞부분의 프리앰블 영역(preamble field)은 수신부에서 프레임 동기화 및 프레임의 시작을 인지하기 위해 사용되며, 16진수 0xAAAAAAAA의 4 바이트로 구성하였다. 상기 프리앰블 값은 수신 신호처리 과정 중 인터럽트 발생을 위해 최상위 비트 MSB가 1인 임의의 값을 적용한 것이다. 프리앰블 영역 바로 뒤의 SFD(start frame delimiter) 영역은 프리앰블 영역의 끝과 패킷 데이터의 시작을 알려주는 기능을 수행한다. 본 논문에서는 SFD 영역을 상기 목적 외에 수신 신호 세기(received signal strength indicator, RSSI) 측정

Preamble field (4 bytes)	SFD field (1 byte)	Frame length field (1 byte)	Information data field (variable)
-----------------------------	-----------------------	--------------------------------	--------------------------------------

그림 6. 프레임 포맷

을 위한 영역으로도 활용하였으며, 영역의 값은 0xFF로 설정하였다. 다음으로, 프레임 길이 영역(frame length field)은 상위 계층에서 전달되는 정보 데이터(information data)의 바이트 수를 나타내며, 1바이트로 구성되어 있기 때문에 프레임 당 최대 255바이트의 정보 데이터를 전송할 수 있다.

IV. 통신 실험 및 결과

4.1 일대일 통신 실험

구현된 모뎀의 통신 성능 검증을 위해 일대일(point-to-point) 통신과 일대다(point-to-multipoint) 통신으로 구분하여 실험을 수행하였으며, 일대일 통신 실험은 실내의 구조와 실외의 연못에서 수행되었다. 일대일 통신 실험에서 모뎀간의 통신을 위해 그림 6에 제시한 프레임 포맷을 이용하였으며, 비트 오류 측정을 위해 정보 데이터의 길이는 임의적으로 127 바이트로 고정하였다.

4.1.1 실내 통신 실험

실내 실험 환경은 그림 7에 제시되어 있으며, 구조의 가로, 세로, 높이는 각각 150cm, 70cm, 70cm이다. 두 모뎀 사이의 거리는 100cm로 설정하였고, 각 모뎀은 모뎀 제어와 모니터링을 위해 RS-232 케이블을 통해 컴퓨터와 연결하였다. 반송파 주파수는 앞서 언급한 30kHz를 이용하였으며, 데이터 전송 속도와 변조시간을 변화시키면서 비트 오류 및 수신 신호의 세기를 측정하였다.

표 1은 그림 3의 심볼 당 변조시간(T_2) 변화, 즉 신호 송출 시간 변화에 따른 수신 신호의 세기를 나타내고 있다. 여기서, 심볼 당 변조시간(T_2)은 반송파 주파수의 역수인 $1/f_c$ 의 배수들로 설정하였다. 수신 신호 세기는 수신 프레임 중 SFD 영역에 대하여 MCU의 ADC 기능을 이용하여 0x00에서 0xFF까지 256 레벨로 선형 변환시켜 획득하였다. 실험 결과에 의하면, 심볼 당 변조시간이 증가할수록 수신 신호

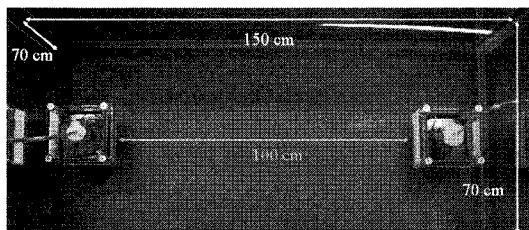


그림 7. 구조 실험 환경

표 1. 심볼 당 변조시간(T_2) 변화에 따른 수신 신호 세기

	심볼 당 변조시간(T_2)				
	$1/f_c$	$2/f_c$	$3/f_c$	$5/f_c$	$10/f_c$
수신 신호 세기	0x4B	0xAE	0xDE	0xF6	0xFF

표 2. 데이터 전송 속도와 심볼 당 변조시간(T_2) 변화에 따른 비트 오류

		심볼 당 변조시간(T_2)	
		$2/f_c$	$3/f_c$
전송 속도 (kbps)	1.0	0.0	0.0
	1.2	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$
	1.5	$4.1 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-2}$

호 세기가 커짐을 알 수 있다. 한편, 변조시간을 $2/f_c$ 로 고정한 후 두 모뎀간의 거리를 변화시키면서 수신 신호 세기 변화를 측정된 결과 거리가 가까워 질수록 수신 신호의 세기가 커짐을 확인할 수 있었으며, 이는 수신 신호 세기 측정값이 채널의 상태 또는 모뎀 간의 거리 추정을 위한 정보로 이용될 수 있음을 의미한다.

표 2는 데이터 전송 속도와 심볼 당 변조시간 변화에 따른 비트 오류(bit error rate, BER)로, 각 비트 오류를 얻기 위해 10^6 비트를 송수신하였다. 전송 속도를 1kbps로 고정하였을 때, 변조시간이 $1/f_c$ 인 경우에는 신호 수신에 원활하지 않아 비트 오류 측정이 불가하였으며 변조시간이 $2/f_c$, $3/f_c$ 인 경우에는 전송 오류가 발생하지 않았다. 한편, 전송 속도가 1.2kbps, 1.5kbps인 경우에는 1kbps에서 획득한 비트 오류에 비해 상당히 높은 비트 오류를 보임을 확인하였으며, 변조시간이 증가할수록 비트 오류가 증가함을 알 수 있었다. 이는, 심볼 당 변조시간이 짧아질수록 데이터 전송 속도를 증가시킬 수 있지만 수신 신호 세기 감소로 인하여 정보 손실이 커질 수 있으며, 변조시간이 길어질 경우 수신 신호의 세기는 증가하지만 다중경로 페이딩으로 인한 심볼 간의 간섭 증가를 야기할 수 있음을 의미한다.

4.1.2 실외 통신 실험

실외 실험은 그림 8에 보인 연못에서 수행하였으며, 연못의 가로, 세로, 깊이는 각각 40m, 60m, 1~5m이다. 모뎀 간의 LOS(line of sight) 경로 확

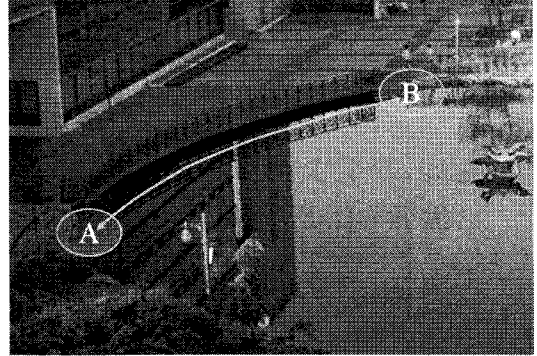


그림 8. 연못 실험 환경

보를 위해 그림 8의 A와 B지점 사이에 모뎀을 배치시켜 비트 오류 측정을 수행하였으며, 모뎀 간의 통신 거리는 1m, 5m, 10m, 30m 간격으로 설정하였다. 비트 오류 측정을 위한 프레임 포맷과 모뎀 제어 및 모니터링 방법은 수조 실험과 동일하다.

통신 거리, 변조시간과 데이터 전송 속도 변화에 따른 비트 오류율을 표 3~6에 나타내었다. 여기서

표 3. 모뎀 간 통신 거리 1m에서 측정된 비트 오류

		심볼 당 변조시간(T_2)			
		$3/f_c$	$5/f_c$	$10/f_c$	$20/f_c$
전송 속도 (kbps)	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2.0	0.0	X	X	—

표 4. 모뎀 간 통신 거리 5m에서 측정된 비트 오류

		심볼 당 변조시간(T_2)			
		$3/f_c$	$5/f_c$	$10/f_c$	$20/f_c$
전송 속도 (kbps)	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2.0	X	X	X	—

표 5. 모뎀 간 통신 거리 10m에서 측정된 비트 오류

		심볼 당 변조시간(T_2)			
		$3/f_c$	$5/f_c$	$10/f_c$	$20/f_c$
전송 속도 (kbps)	0.5	X	X	0.0	0.0
	1.0	X	X	0.0	0.0
	2.0	X	X	X	—

표 6. 모델 간 통신 거리 30 m에서 측정된 비트 오류

		심볼 당 변조시간(T_2)			
		$3/f_c$	$5/f_c$	$10/f_c$	$20/f_c$
전송 속도 (kbps)	0.5	X	X	0.0	0.0
	1.0	X	X	$1.2 \cdot 10^{-5}$	X
	2.0	X	X	X	—

‘X’는 다중경로 페이딩 또는 수신 신호 감쇄의 영향으로 통신이 원활히 이루어지지 않았음을 의미하며, ‘—’는 변조시간(T_2)이 심볼구간(T_1)을 초과하여 정상적인 통신이 불가능함을 나타낸다.

표 3은 두 모델간의 거리를 1m로 고정시킨 후에 신호 송출 시간과 데이터 전송 속도를 변화시켜 가면서 측정된 비트 오류를 보여주고 있다. 실험에 의하면, 모델 간의 거리가 1m인 경우 최대 2kbps의 전송 속도로 오류없이 통신이 가능하였다. 한편, 전송 속도가 2kbps이고 변조시간이 $5/f_c$, $10/f_c$ 인 경우에는 비트 오류 측정이 불가능하였는데, 이는 전송 속도 증가로 인해 심볼의 보호구간이 감소하였고 이로 인해 다중경로 페이딩 신호가 심볼 간 간섭을 유발하였기 때문이다. 상기 실험 결과를 수조 실험과 비교해 보면, 연못 실험의 경우 다중경로 페이딩 감소의 영향으로 2kbps의 전송 속도에서도 신뢰성 있는 데이터 전송이 가능함을 알 수 있다.

표 4는 두 모델 간의 거리가 5m인 경우의 비트 오류를 보여주고 있다. 전송 속도가 1kbps 이하인 경우에는 전송 오류가 발생하지 않았지만, 2kbps에서는 모든 경우에 있어서 통신이 제대로 이루어지지 않았다. 이는 통신 거리가 증가함에 따라 경로 감쇄로 인해 수신 신호의 크기가 감소하였기 때문이다.

표 5와 표 6은 각각 모델 간 통신 거리 10m와 30m인 경우에 대한 비트 오류를 나타내고 있다. 실험 결과 심볼 당 변조시간이 $3/f_c$, $5/f_c$ 이하인 경우에는 수신 신호의 세기가 미약하여 모델 간 통신이 거의 불가능한 반면 변조시간이 $10/f_c$ 인 경우에는 전송 속도 1kbps까지 매우 낮은 비트 오류로 통신이 가능함을 확인하였다. 표 6에서 데이터 전송 속도가 1kbps이고 변조 시간이 $20/f_c$ 인 경우에는 신호 송출 시간 증가의 영향으로 변조시간이 $10/f_c$ 인 경우에 비해 수신 신호 세기는 소폭 증가하지만 보호시간이 감소하고 이로 인해 심볼 간 간섭이 증가하여 원활한 데이터 수신이 불가능하였다.

상기 연못 실험 결과와 수조 실험 결과를 비교해 보면, 연못에서의 통신 성능이 더 우수함을 고찰할 수 있다. 이는, 연못과 같이 개방된 실험 환경에서는 다중경로 페이딩 신호가 감소하고 이에 의해 심볼 간 간섭도 감소함을 의미한다.

4.2 일대다 통신 실험

일대다 통신 실험은 실제 수조 실험과 동일한 환경에서 수행되었으며, 그림 9에 제시된 것처럼 게이트웨이, 싱크노드와 세 개의 센서노드들을 배치하여 통신 성능을 검증하였다. 센서노드들과 게이트웨이는 한 쌍의 송·수신 센서를 가지고 있으며, 센서의 방향성을 고려하여 센서노드 및 게이트웨이의 통신용 센서와 싱크노드의 통신용 센서가 마주 보도록 배치시켰다. 즉, 게이트웨이는 바닥에, 센서노드는 측면에 각각 한 쌍의 초음파 센서가 배치되고, 싱크노드는 각 통신 모델과 마주한 4면에 각각 한 쌍의 초음파 센서가 배치된다. 또한, 각 모델은 이전 실험과 동일하게 모델 제어 및 수신 데이터 확인을 위해 개별적인 모니터링 컴퓨터에 연결되어 있다.

일대다 통신 실험의 데이터 전송 과정을 하향링크(downlink)와 상향링크(uplink)로 구분하여 그림 10에 제시하였다. 여기서 실선은 하향링크, 점선은 상향링크를 의미하며, 각 선에 위치한 숫자는 데이터 전송 순서를 나타낸다. 즉, 하향링크의 데이터 처리 및 전송 과정은 다음과 같다. 게이트웨이에 연결된 모니터링 컴퓨터로부터 전송하고자 하는 정보 데이터가 입력되면 게이트웨이에서 그림 6의 프레임 포맷을 갖는 물리계층 데이터 패킷(PHY protocol data unit, PPDU)을 구성한다. 이후, PPDU는 싱크노드로 전송되고 데이터 패킷이 정상적으로 수신되었을 경우 센서노드로 보내진다. 센서노드는 수신된

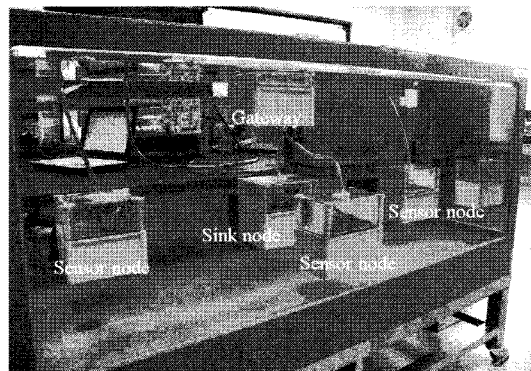


그림 9. 일대다 통신 실험 환경

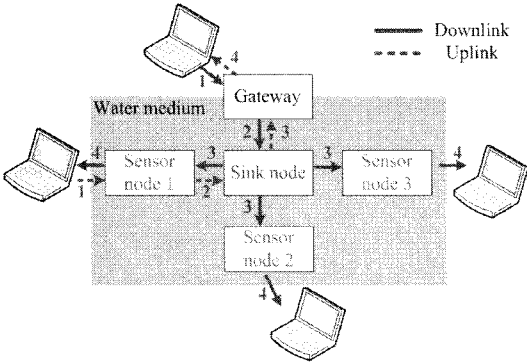


그림 10. 일대다 통신 실험의 데이터 전송 과정

PPDU 패킷에서 정보 데이터를 추출하여 모니터링 컴퓨터로 전송하고, 최종적으로 모니터링 컴퓨터에서 이를 화면에 출력한다. 상향링크에서의 데이터 전송과정은 하향링크의 역순이며 상세 처리 과정에 대한 기술은 생략한다.

본 논문에서는 일대다 통신 실험의 예로 문자열 'abcdefghijklmnpqrstuvwxy'를 정보 데이터로 설정하여 상향링크 실험을 수행하였다. 그림 11은 상기 문자열을 센서노드 1에 입력하였을 때 게이트웨이에 연결된 모니터링 컴퓨터에서 캡처한 화면이다. 그림 11에서 사각형 내에 표시된 부분이 수신 데이터의 정보를 나타내는 것으로, 'Source'는 정보 데이터를 송신한 노드, 'PSDU(PHY service data unit) length'는 수신된 정보 데이터의 바이트 수, 'PSDU'

Port	Baud	Parity	Data Bits	Stop Bits
COM2	9600	None	8	1


```

Fork... Comm Events... Flow Control... Timeouts... Disconnect
* [0]: Transmit stored data *
* [1]: *Receive Tx data from PC* *
* [3]: CCA request *
* [5]: ED request *
* [7]: PLME GET request *
* [9]: Set TRX state request *
* [B]: PLME SET request *
*****
>> 9
*****
[3] : Force TRX OFF
[6] : RX ON
[8] : TRX OFF
[9] : TX ON
*****
State >> 6
PLME_SET_TRX_STATE_confirm : SUCCESS
Current state : RX ON
>>
PD_DATA indication
Source : Sensor node 1
PSDU length : 26 Bytes
RSSI value : 0xEB
PSDU : abcdefghijklmnpqrstuvwxy
    
```

Information on received data

그림 11. 일대다 통신 실험 결과

는 정보 데이터를 의미한다. RSSI value는 수신 신호의 세기를 나타내는 것으로 싱크노드에서 게이트웨이로 전송한 데이터 패킷의 수신 신호 크기의 미한다. 실험 결과에 의하면 송신 정보와 수신 정보가 동일함을 알 수 있으며, 이는 곧 개발한 모뎀이 일대일 통신뿐만 아니라 일대다 통신 역시 지원 가능하다는 것을 나타내는 동시에 추후 상위 계층과 쉽게 연동할 수 있음을 의미한다.

V. 결론

본 논문에서는 수중 센서네트워크 구성의 필수 요소인 저비용, 저전력 수중 통신 모뎀을 설계, 구현하였고 실내와 실외 실험을 통하여 모뎀의 성능을 확인하였다. 실내 수조 실험 결과 최대 1.5kbps의 전송 속도로 통신이 가능하였으며, 실외 연못 실험의 경우 모뎀 간 통신 거리 1m에서 전송 속도 2kbps, 통신 거리 30m에서 전송 속도 1kbps로 통신이 가능함을 확인하였다. 또한, 센서네트워크 시스템 구성을 고려하여 게이트웨이, 싱크노드, 세 개의 센서노드를 이용한 일대다 통신을 검증하였다.

다양한 응용분야를 갖는 수중 센서네트워크 시스템에 제안 모뎀을 적용하기 위해서는 해양을 포함한 여러 환경에서의 실험이 수행되어야 하며, 모뎀의 최적화 설계 및 내구성 보완 등이 연구되어야 할 것이다. 또한, 본 논문에 제안된 모뎀은 MCU의 연산 능력의 한계로 인해 이진 진폭편이변조를 이용하여 모뎀 간의 통신이 수행되었지만, 추후 고성능 디지털 신호처리 프로세서를 사용할 경우 고차 변조 기법 및 다양한 수신 알고리즘 적용을 통해 통신 속도와 통신 거리를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] Benthos, Inc. <http://www.benthos.com>
- [2] LinkQuest, Inc. <http://www.link-quest.com>
- [3] I. F. Akyildiz, D. Pompili and T. Melodia, "Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks," *ACM Sigbed Review*, vol. 1, no. 2, Jul. 2004.
- [4] 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.

- [5] J. Heidemann, W. Ye, J. Wills, A. Syed and Y. Li, "Research challenges and applications for underwater sensor networking," in *Proc. IEEE WCNC*, Las Vegas, vol. 1, pp. 228-235. Apr. 2006.
- [6] 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 Seneors*, Irvine, CA, pp. 163-166, Oct. 2005.
- [7] J. Wills, W. Ye and J. Heidemann, "Low-power acoustic modem for dense underwater sensor networks," in *Proc. ACM International Wrokshop on Underwater Networks (WUWNet)*, Los Angeles, CA, pp. 79-85, Sep. 2006.
- [8] 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. IEEE OCEAN 2008*, Quebec, Canada, Sep. 2008.

변 무 광 (Moo-Kwang Byeon)

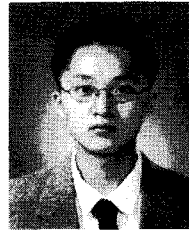
정회원



2006년 2월 강릉대학교 전자공
학과 학사
2009년 2월 강릉대학교 전자공
학과 석사
<관심분야> 변조 및 채널 부호,
인지 라디오, DSP 구현

박 성 준 (Sung-Joon Park)

종신회원



1996년 2월 연세대학교 전과공
학과 학사
1998년 2월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 석사
2004년 2월 한국과학기술원 전
자전산학부 박사
2003년 9월~2005년 3월 삼성
전자 정보통신연구소 책임연구원
2005년 4월~현재 강릉원주대학교 전자공학과 조교수
<관심분야> 디지털 통신 시스템, 변조 및 채널 부
호, 모뎀 설계 및 구현, 무선 센서네트워크