

수중 음향 통신을 위한 초소형 모뎀 설계 및 구현

정희원 전준호*, 조헌철*, 김창화*, 류영선**, 종신회원 박성준*

Design and Implementation of a Micro-Modem for Underwater Acoustic Communications

Jun-Ho Jeon*, Hunchul Cho*, Changhwa Kim*, Young-sun Ryuh** *Regular Members*,
Sung-Joon Park*^o *Lifelong Member*

요 약

최근 해양 환경 모니터링과 해양 개발에 대한 관심이 증대됨에 따라 수중 무선센서네트워크 구성 및 이를 위한 저전력 수중 통신 모뎀에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다. 이에 본 논문에서는 초소형 무지향성 트랜스듀서를 탑재한 수중 음향 통신 모뎀을 설계하고 구현한다. 또한, 개발한 모뎀을 사용하여 수조와 실외 환경에서 공급 전압과 통신 거리에 따른 성능 실험을 실시하고 결과를 분석한다. 실외 환경에서의 실험 결과에 의하면, 개발한 모뎀에 12 V를 공급하였을 때 40 m 거리에서 200 bps, 10^{-5} 비트오율로 단방향 수중 무선 통신이 가능하였다. 본 논문에서 구현한 모뎀은 초소형, 저전력, 무지향성 특성을 가지므로 수중 무선센서네트워크에 기반한 다양한 응용 시스템에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words : Acoustic Communication, Acoustic Modem, Underwater Wireless Sensor Networks

ABSTRACT

As the interest in ocean environment monitoring and ocean development has been increased, the need for researches on underwater wireless sensor network (UWSN) and low power consuming acoustic modem for UWSN has been arisen. In this paper, we design and implement a micro-modem equipped with a tiny and omnidirectional transducer for underwater acoustic communications. In addition, we make experiments in a water tank and a pond in order to verify the performance of the developed modem in terms of supply voltage and communication distance, and analyze the results. According to the outdoor experiments, the modem can send data wirelessly in underwater at a distance of 40 meter with a data rate of 200 bps and a bit error rate of 10^{-5} when the supply voltage is 12 V. Due to its small size, low power consumption and omnidirectional property, it is expected that the modem which is implemented in this paper could be utilized for various applications based on UWSN.

1. 서 론

식량, 광물, 에너지를 비롯한 각종 자원들이 풍부하게 보존되어 있는 해양은 인류 최후의 보고로서 과학기술의 발전과 더불어 우리 생활에 더욱 가

까워지고 있다. 오늘날 해양 자원 개발에 대한 연구는 활발히 진행 중이며, 해양 환경 모니터링, 재해 방지 시스템 구축, 군사적 감시 등의 용도를 위해 무선 수중 센서네트워크에 대한 관심이 증가하고 있다.

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음.(NIPA-2011-C1090-1121-0001)

* 강릉원주대학교 ITRC (°: 교신저자), ** 한국생산기술연구원 수중로봇개발단

논문번호: KICS2011-01-075, 접수일자: 2011년 1월 31일, 최종논문접수일자: 2011년 4월 6일

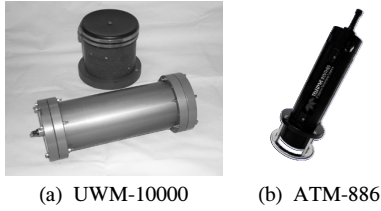


그림 1. 고휘력 수중 모델

수중 음향 통신에 대한 연구 및 개발은 주로 해양 자원 채취, 심해 파이프 제어, 수중 이동 체계 등을 위한 고가의 고휘력 수중 모델에 대해 이루어져 왔다^{[1],[2]}. 그림 1의 (a)와 (b)는 LinkQuest사와 Benthos사에서 제작한 상용 고휘력 수중 모델들이며, 각 모델의 상세 특성은 표 1에 나타내었다. 일반적으로, 고휘력 수중 모델은 높은 전송 속도와 장거리 통신을 지원하지만, 소모전력과 비용 및 크기 측면에서 수중 근거리 통신에 적합하지 않다.

이에 [3]-[5]의 논문에서 저전력 수중 모델의 필요성이 제기되었으며 [6], [7]에서 저전력 수중 모델의 구현 가능성을 검증하는 초기 연구가 수행되었는데, [6]에 제안된 CORAL 시스템은 수중에서 1 m 이내의 단방향 통신을 검증하였다. 보다 진보된 연구 결과는 [8], [9]에서 찾을 수 있으며, 그림 2 (a)는 Tritech사에서 개발한 초소형 수중 모델이다^[8]. Tritech사 모델 Micron은 직경과 높이가 각각 56, 76 mm, 소모전력 7.92 W로 최장 500 m의 통신 거리를 제공하지만 전송 속도가 40 bps에 불과하고 지향성 방사 패턴을 가지고 있어 다양한 응용 시스템에 적용하기에 적합하지 않다. 그림 2의 (b)는 본 연구팀이 이전 연구를 통해 개발한 수중 모델 프로토타입으로 거리 측정용 방적형 초음파센서를 사용하여 최대 30 m의 전송거리와 2 kbps의 전송 속도를 검증한 바 있다^[9]. 그러나, 상기 프로토타입에 탑재된 초음파센서는 지상 근거리 측정 용도의 트랜스듀서로써, 수압 등의 영향 때문에 수중에서 장시간 사용이 불가하고 초음파센서에 인가할 수 있는 전압이 제한되어 30 m 이상의 통신 거리

표 1. 고휘력 수중 모델 특성

	UWM-10000	ATM-886
크기(Ø×H)	150×580 mm	139×366 mm
소모전력	40 W	42 W
통신 거리	7 km	6 km
전송 속도	5 kbps	15.36 kbps

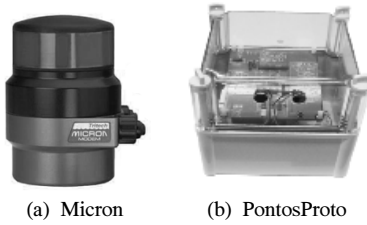


그림 2. 저전력 수중 모델

표 2. 저전력 수중 모델 특성

	Micron	PontosProto
크기	56×76 mm (Ø×H)	170×170×180 mm (L×W×H)
소모전력	7.92 W	0.33 W
통신 거리	500 m	30 m
전송 속도	40 bps	2 kbps

를 확보할 수 없다. 표 2는 전술한 두 모델에 대한 상세 특성을 나타낸다.

수중 모델을 이동형 수중로봇에 탑재하거나 수중 무선센서네트워크의 싱크노드로 활용하기 위해서는 수중용 무지향성 트랜스듀서를 사용한 수중 모델 개발이 선행되어야만 한다. 이에, 본 논문에서는 [9]의 사전 연구를 기반으로 수중용 무지향성 트랜스듀서를 탑재한 초소형 단방향 통신 모델을 설계하고 구현한다. 또한, 구현한 모델의 성능을 검증하기 위하여 실내와 실외 환경에서 일대일 통신 실험을 수행하고 그 결과를 분석한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서 초소형 수중 통신 모델의 하드웨어에 대해서 설명하고, III장에서 수중 모델의 설계 및 구현 방법에 대해 서술한다. IV장에서 수중 실험 환경을 설명하고 실내·외에서의 실험 결과를 비교 분석한다. 끝으로 V장에서 결론 및 향후 연구를 제시한다.

II. 수중 통신 모델 하드웨어

2.1 트랜스듀서

트랜스듀서는 전기 신호를 음향 신호로 변환하여 수중 채널로 방사하거나 수중 채널을 통해 전달된 음향 신호로부터 전기 신호를 획득하는 기능을 수행한다. 표 3은 본 연구 개발을 위해 사용한 상용 트랜스듀서의 상세 특성이다. 70 kHz의 공진 주파수를 갖는 트랜스듀서는 147 dB re 1uPa/V at 1m의 송신 감도와 -200 dB re 1V/uPa의 수신 감도를

표 3. 초음파 트랜스듀서 특성

특성	설명
공진주파수	70 kHz
방향성	무지향성(수평축, 수직축)
송신감도	147 dB re 1uPa/V at 1m
수신감도	-200 dB re 1V/uPa
크기(Ø)	34 mm

가지며, 지름이 34 mm인 구의 형태로 음향 신호 전달에 있어서 3차원 무지향성 특성을 갖는다.

2.2 모뎀 하드웨어

그림 3 (a)는 상기 무지향성 트랜스듀서를 탑재한 초소형 수중 통신 모뎀의 정면, (b)는 수중 통신 모뎀 보드의 측면 실사이다. 모뎀 보드는 2층 구조의 원통 형태로 지름 70 mm, 높이 35 mm의 규격을 가지며 배터리 등 외부 전원에 의해 구동된다. 모뎀 제어를 위한 마이크로컨트롤러(microcontroller unit, MCU)로 ATmega128을 사용하였고, 개발한 수중 모뎀과 타 보드 또는 응용 프로그램을 연동시키기 위해 SPI와 UART 통신 포트를 구성하였다. 리튬이온 배터리 14.8 V를 모뎀에 공급할 경우 모뎀 보드 및 트랜스듀서에서 소모하는 전력은 2.9 W 이고, 공급 전원의 증가에 따라 소모전력도 증가한다. 표 4는 개발한 모뎀의 상세 특성을 나타낸다.

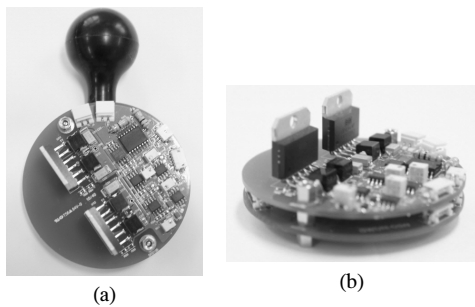


그림 3. 초소형 수중 통신 모뎀

표 4. 초소형 수중 통신 모뎀 특성

특성	설명
모뎀 보드 크기 (Ø×H)	70×35 mm
MCU	ATmega128
인터페이스	SPI, UART
배터리	14.8 V 8.8 AH Li-ion
소모전력	2.9 W @ 14.8 V

III. 수중 통신 모뎀 설계 및 구현

3.1 송신부

그림 4는 개발 모뎀의 송신부 구조를 간략히 도한 블록다이어그램으로 데이터의 송신 과정을 나타낸다. 전송할 데이터는 MCU에서 물리계층 프레임 형식에 맞게 변환되고 변조와 증폭 과정을 거친 후 트랜스듀서를 통해 수중 채널로 전달된다.

디지털부 송신 신호 처리 과정에 대한 상세 설명은 다음과 같다. MCU는 전송하고자 하는 데이터(PSDU, physical-layer service data unit)로부터 물리계층 전송 프레임(PPDU, physical-layer payload data unit)을 생성한다. 즉, PPDU는 수신 수중 모뎀에서 프레임 동기화 및 프레임의 시작을 인지하기 위한 4 바이트의 프리앰블(preamble), 프리앰블 영역의 끝을 알려주기 위한 1 바이트의 SFD (start frame delimiter), PPDU에 탑재된 PSDU의 길이를 알려주는 1 바이트의 data length, 가변 길이의 데이터 PSDU 순으로 구성된다.

이 연구에서는 아날로그 송·수신 모듈 크기를 최소화하기 위해 이진 진폭편이변조(binary amplitude shift keying)를 사용하였다. 또한, 매 비트 전송을 위해 변조 구간 뒤에 보호 구간을 두었는데, 이는 수중 채널 전송 중 발생하는 극심한 다중 경로 페이딩으로부터 변조된 신호를 보호하기 위해서이다. 즉, 전송하고자 하는 비트가 '1'인 경우, 70 kHz의 정현파 신호가 변조 구간동안 출력되고 보호 구간에는 출력되지 않는다. 전송비트가 '0'인 경우, 변조 구간과 보호 구간에서 신호는 출력되지 않는다.

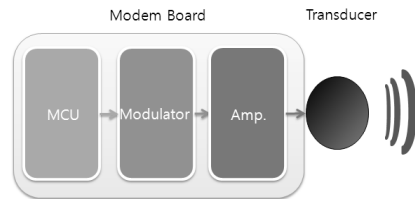


그림 4. 송신부 블록다이어그램

3.2 수신부

그림 5는 구현한 수중 모뎀의 수신부 블록다이어그램이며, 수신 신호 처리 과정에 대한 상세 설명은 다음과 같다. 수중 채널을 통해 전달받은 음향 신호는 수신부 종단의 트랜스듀서에 의해 전기적 신호로 변환되는데, 이 신호의 세기가 매우 작기 때문에 증폭기를 사용하여 신호 검출이 가능한 레벨까지

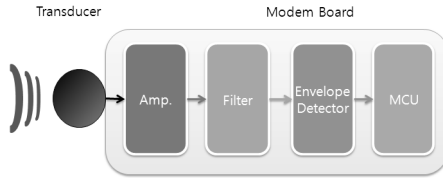


그림 5. 수신부 블록다이어그램

증폭시킨다. 증폭기를 거친 신호는 70 kHz의 대역 통과 필터에 의해 잡음 성분이 제거된 후 이진 진폭편이변조 비동기 검출 회로인 포락선 검파기에 의해 디지털 신호로 변환된다. MCU에서는 획득한 PPDU로부터 PSDU를 추출하고 일련의 수신 과정을 종료한다.

IV. 통신 실험 및 결과

4.1 실험 환경

그림 6은 구현한 수중 모뎀의 통신 성능을 검증하기 위해 구축한 시스템 구조도이다. 송신측 PC에서 입력한 임의의 데이터는 송신측 모뎀 보드와 트랜스듀서를 거쳐 수중 채널을 통해 전달되고, 수신측 트랜스듀서와 모뎀 보드에서 처리된 후 수신측 PC 모니터에 출력된다. 여기서, 실험의 편의를 위해 트랜스듀서만 물 속에 잠기게 하였고, 실내 수조와 실외 연못에서 통신 실험을 수행하였다.

구축한 수중 통신 시스템을 검증하기 위해 활용한 수조와 연못을 그림 7에 나타내었다. 실내 실험

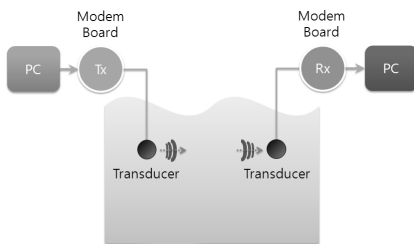
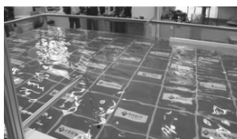


그림 6. 수중 통신 실험 구조도

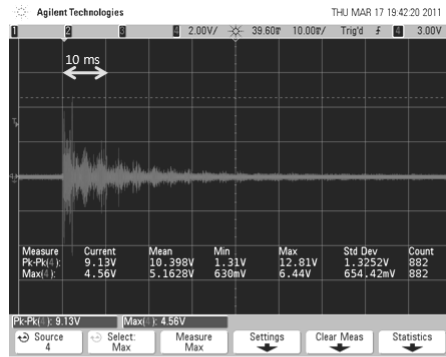


(a) 수조

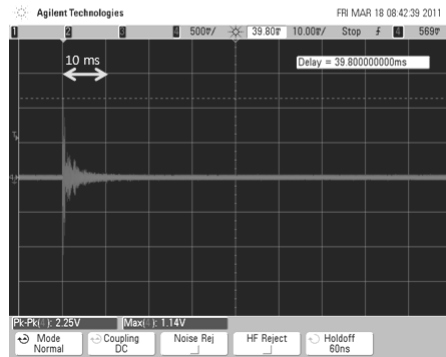


(b) 연못

그림 7. 실내의 실험 환경



(a) 수조



(b) 연못

그림 8. 실내의 임펄스 응답

을 위한 수조의 가로, 세로, 수심은 각각 7 m, 4 m, 0.4 m이었고, 실외 실험을 위한 연못의 가로, 세로, 수심은 각각 60 m, 40 m, 1~5 m이었다.

한편, 수조와 연못의 채널 환경을 파악하기 위해 임펄스 응답을 측정하고 그림 8에 나타내었다. 수조의 경우 협소한 공간과 얇은 수심으로 인해 수심 ms에 달하는 다중경로 신호가 발생할 수 있음을 관찰할 수 있다. 이에, 수조 통신 실험에서는 변조심볼의 길이를 20 ms로, 즉 데이터의 전송속도를 50 bps로 고정하였다. 수조보다 개방된 공간인 연못에서는 임펄스 응답이 수 ms 동안 지속되었고, 이러한 실험적 데이터에 기반하여 연못 실험에서는 변조심볼의 길이를 5 ms로, 즉 데이터의 전송속도를 200 bps로 고정하였다.

4.2 수조 실험

변조심볼을 구성하는 변조 구간과 보호 구간의 비율이 수중 음파통신에 미치는 영향을 분석하기 위해 수조에서 송신 모뎀과 수신 모뎀의 거리는 2.5 m, 변조심볼의 길이는 20 ms로 고정하고 실험을 실시하였다. 표 5는 송신 모뎀 트랜스듀서의 입력

표 5. 변조 구간에 따른 수신부 출력 전압(V_{out})

	V_{out} [V_{p-p}]			
	$N_p=25$	$N_p=50$	$N_p=75$	$N_p=100$
$V_{in}=10$ [V_{p-p}]	1.95	2.17	2.25	1.43
$V_{in}=20$ [V_{p-p}]	4.13	4.31	4.75	4.50
$V_{in}=30$ [V_{p-p}]	6.31	6.56	6.75	6.81
$V_{in}=40$ [V_{p-p}]	8.01	7.37	8.56	7.68

전압(V_{in})과 변조 구간의 길이에 따른 수신 모뎀 트랜스듀서의 출력 전압(V_{out})이다. 여기서, N_p 는 공진 주파수인 70 kHz 정현파 펄스의 개수를 의미하며, 일례로 $N_p=100$ 일 경우 변조 구간의 길이는 1.43 ms(=100/70kHz)가 된다. 실험 결과에 의하면, 송신 모뎀 트랜스듀서에 인가되는 입력 전압이 일정할 경우 수신 모뎀에서는 N_p 와 무관하게 거의 일정한 출력 전압을 획득할 수 있었는데, 이는 변조심볼의 길이가 다중경로를 극복할 수 있을 만큼 충분히 길다면 변조심볼 내 변조 구간의 증감이 수신 성능에 영향을 미치지 않음을 의미한다. 한편, 표 5를 통해 수신 모뎀 트랜스듀서의 출력 전압은 송신 모뎀 트랜스듀서의 입력 전압에 거의 비례함을 관찰할 수 있다.

공급 전압 및 통신 거리에 따른 수중 모뎀의 성능을 검증하기 위하여 송신 모뎀에 공급되는 전원 (V_s)을 12 V, 14.8 V, 35 V로, 송·수신 모뎀 간 통신 거리(d)를 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm로 변경시키면서 수신 모뎀의 트랜스듀서에 출력되는 전압(V_{out})을 측정하였다. 상기 공급 전원 V_s 를 기반으로 송신부의 아날로그 신호는 증폭기를 거친 후 각각 40, 50, 110 V_{p-p} 로 증폭되며 송신 트랜스듀서에 인가된다. 그림 9에 나타낸 실험 결과에 따르면,

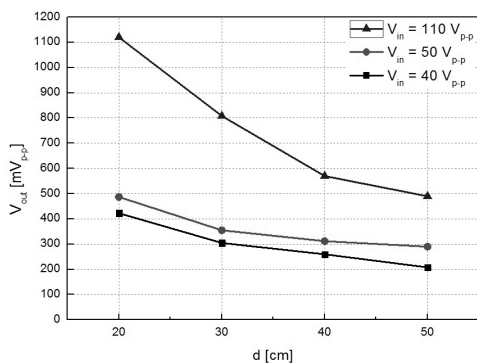


그림 9. 수조에서 송신 모뎀 트랜스듀서 입력 전압(V_{in})과 통신 거리(d)에 따른 수신 모뎀 트랜스듀서 출력 전압(V_{out})

수신 모뎀 트랜스듀서의 출력 전압(V_{out})은 송신 모뎀 트랜스듀서의 입력 전압(V_{in})이 증가할수록 통신 거리(d)가 감소할수록 증가함을 관찰할 수 있다. 또한, 실험 결과에서 통신 거리에 따라 출력 전압 V_{out} 이 급격히 감소하지는 않는 것을 관찰할 수 있는데 이는 수조의 협소성에 기인한 다중경로 신호들이 원신호와 중첩되었기 때문이다. 한편, 수조에서는 짧은 통신 거리로 인해 그림 9의 모든 경우에 대해 200 m V_{p-p} 이상의 V_{out} 을 획득할 수 있었고, 50 bps의 전송속도에서 수신부의 증폭, 대역통과필터링, 포락선 검파 후 오류없이 수중 통신이 가능하였다.

4.3 실외 실험

실외 연못 실험은 수조 실험과 동일한 방식으로 12 V, 14.8 V, 35 V의 공급 전압(V_s)에서 송·수신 모뎀 간의 통신 거리를 20 m, 30 m, 40 m, 50 m로 변화시키면서 수신 모뎀 트랜스듀서에서 출력되는 전압(V_{out})을 측정하였다. 데이터 전송속도는 4.1절에서 상술한 바와 같이 200 bps로 고정하였다.

그림 10은 연못에서 송신 모뎀의 공급 전압(V_{in})과 송·수신 모뎀 간 통신 거리(d)를 변경하면서 측정된 수신 트랜스듀서의 출력 전압(V_{out})을 나타낸다. 연못 실험의 결과는 수조 실험의 결과와 전반적으로 유사하며, 수신 전압의 크기는 공급 전압에 비례하여 통신 거리에 반비례함을 관찰할 수 있다.

그림 11은 송신 모뎀 트랜스듀서에 인가되는 입력 전압(V_{in})과 통신 거리(d)에 따른 수신 비트오율 (BER) 특성 그래프이다. 실험 결과에 따르면, 통신 거리가 10, 20 m일 경우 20 V의 V_{in} 에서도 10^{-3} 이하의 비트오율을 획득함을 알 수 있으며, 40 m의

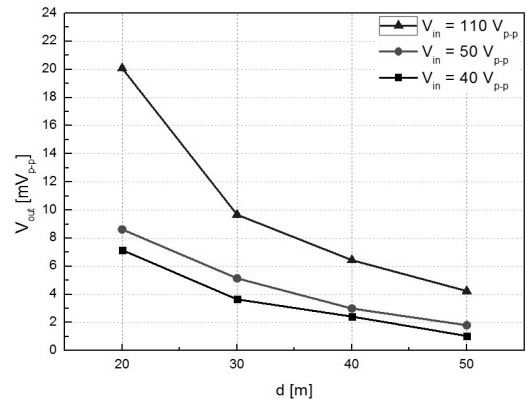


그림 10. 연못에서 송신 모뎀 트랜스듀서 입력 전압(V_{in})과 통신 거리(d)에 따른 수신 모뎀 트랜스듀서 출력 전압(V_{out})

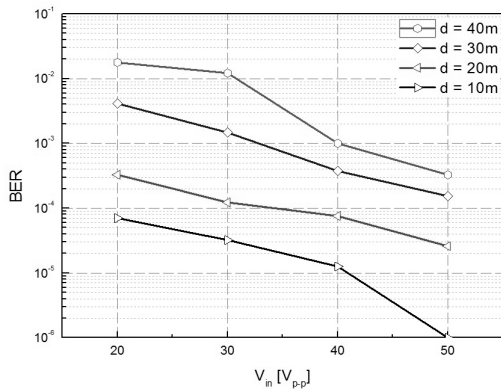


그림 11. 연못에서 송신 모델 트랜스듀서 입력 전압(V_{in})과 통신 거리(d)에 따른 비트오류 특성

통신 거리에서 10^{-3} 의 비트오율로 정보를 전달하기 위해서는 40 V_{p-p}의 전압을 송신측 트랜스듀서에 공급해야 함을 고찰할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 초소형 무지향성 트랜스듀서를 탑재한 수중 음향 통신 모델을 설계하고 구현하였다. 또한, 수조와 실외 연못 환경에서 수중 채널의 특성을 분석하고 공급 전압과 통신 거리에 따른 단방향 통신 성능 실험을 실시하였다. 임펄스 응답을 통해 수조와 연못의 채널 특성을 고찰할 수 있었으며, 개방된 환경에서는 다중경로의 길이가 감소하고 이로 인해 전송속도를 개선할 수 있음을 고찰하였다. 또한, 실험을 통해 수중 채널을 거친 수신 트랜스듀서의 출력 전압은 송신 모델의 공급 전압에 비례하고 송·수신 모델 간 통신 거리에 반비례함을 검증하였다. 성능 지표의 일례로 연못 환경에서 개발 모델에 12 V의 전원을 인가하였을 때 40 m의 통신 거리에서 200 bps의 전송속도와 10^{-3} 의 비트오율로 수중 음파 통신이 가능하였다. 본 논문에서 구현한 모델은 초소형, 저전력, 무지향성 특성을 가지므로 향후 전송속도 개선 및 실험역 등 개방된 장소에서의 양방향 통신 실험 수행 후 수중 무선센서네트워크에 기반한 다양한 해양 응용 시스템에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Teledyne Benthos, Inc., <http://www.teledynebenthos.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, NV, 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 Sensors*, 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 Workshop on Underwater Networks (WUWNet)*, Los Angeles, CA, pp.79-85, Sep., 2006.
 [8] Tritech, Inc., <http://www.tritech.co.uk>
 [9] 변무광, 박성준, "수중 센서네트워크를 위한 초음파 통신 모델 설계 및 구현," 한국통신학회논문지, 34권, 6호, pp.437-444, 2009년 6월.

전 준 호 (Jun-Ho Jeon)

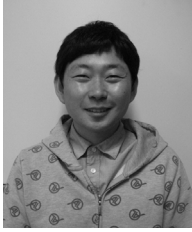
정회원



2007년 2월 강릉원주대학교 전자공학과 학사
 2009년 2월 강릉원주대학교 전자공학과 석사
 2009년~현재 강릉원주대학교 ITRC 전임연구원
 <관심분야> 수중 음향통신, 수중 모델 설계 및 구현, 무선 센서네트워크시스템

조 헌 철 (Hunchul Cho)

정회원



2010년 2월 강릉원주대학교 전자공학과 학사
2010년~현재 강릉원주대학교 ITRC 전임연구원
<관심분야> 임베디드시스템, 전기 회로, 전자 회로

류 영 선 (Young-sun Ryuh)

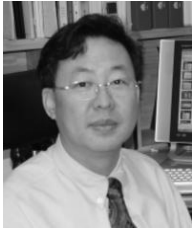
정회원



1984년 2월 서울대학교 바이오시스템 및 소재학부 학사
1986년 2월 서울대학교 바이오시스템 및 소재학부 석사
1997년 2월 서울대학교 바이오시스템 및 소재학부 박사
2003년~현재 한국생산기술연구원 수중로봇개발단 단장, 과학기술연합대학원대학교 지능형로봇공학과 교수
<관심분야> 생체모방 로봇공학

김 창 화 (Changhwa Kim)

정회원



1985년 2월 고려대학교 수학과 육과 학사
1987년 2월 고려대학교 전산학과 석사
1990년 2월 고려대학교 전산학과 박사
1989년~현재 강릉원주대학교 컴퓨터공학과 교수

2005년~현재 강릉원주대학교 ITRC 센터장
<관심분야> 수중 센서네트워크시스템

박 성 준 (Sung-Joon Park)

중신회원



1996년 2월 연세대학교 전파공학과 학사
1998년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
2004년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 박사
2003년 09월~2005년 03월 삼성전자 정보통신연구소 책임연구원
2005년 04월~현재 강릉원주대학교 전자공학과 부교수
<관심분야> 무선 통신, 수중 음향통신, 통신 시스템 설계 및 구현, 무선 센서네트워크시스템