

근거리 수중 음향 네트워크 구현

조아라*, 최영철°, 김승근*, 김시문*, 박종원*

Implementation of a Short-Range Underwater Acoustic Network

A-ra Cho*, Youngchol Choi°, Seung-Geun Kim*, Sea-moon Kim*, Jong-Won Park*

요약

본 논문에서는 통신거리가 최대 200 m, 최대 데이터 전송 속도가 100 kbps인 단일 홉 근거리 수중 음향 네트워크(SrUANet: short-range underwater acoustic network)를 구현한다. SrUANet은 1) 수중의 네트워크 수율 저하를 극복할 수 있는 시분할 다중접속을 위한 스케줄링 알고리즘을 포함하며 상위 계층 기능을 수행하는 리눅스 기반 네트워크 프로토콜 소프트웨어, 2) 물리 계층과 상위 계층 간 인터페이스 소프트웨어, 3) 네트워크 제어 및 상태 감시 기능을 가지는 윈도우 기반의 사용자 운용 GUI 등과 같이 3개의 소프트웨어 모듈로 구성된다. SrUANet은 3단계 검증 시험을 거친다. 1단계는 물리 계층 에뮬레이터를 구현하여 실제 물리 계층의 영향을 받지 않는 시험 환경을 구성함으로써 네트워크 프로토콜 소프트웨어의 무결성을 검증한다. 2단계는 물리 계층과 상위 계층을 통합하여 네트워크 노드를 구성하고 채널 시뮬레이터를 이용한 시험을 수행한다. 이 때, 채널 시뮬레이터는 실제 바다 시험과 유사한 네트워크 시험 환경을 제공한다. 마지막으로, 단문메시지, 이미지, 연속적으로 반복되는 데이터 전송 기능들에 대해서 남해안 실험역 시험 결과를 제시한다. SrUANet은 다수의 수중 로봇용 무선 네트워크에 활용될 수 있다.

Key Words : Software implementation, Single-hop Network, Underwater acoustic networks, Short-range underwater communications, Sea experiment

ABSTRACT

In this paper, we implement a single hop short-range underwater acoustic network (SrUANet) which has communication range up to 200 m and a maximum transmission data rate of 100 kbps. The SrUANet consists of three software modules: 1) linux-based network protocol software that provides functions of the upper layer, including the scheduling algorithm for time-division multiple access, which can overcome underwater network throughput degradation, 2) software for the interface between the physical layer and the upper layer, 3) window-based graphic user interface software for the control and monitoring of the upper layer. A three-step verification test is performed on the SrUANet. The first step is to verify the integrity of the network protocol software by implementing a physical layer emulator that allows the network protocol software to operate independently of the real physical layer. The second step is to develop a network node by integrating the physical layer and the upper layer and perform laboratory test using a channel simulator that provides a network test environment similar to the real sea test. Finally, we give test results at south sea for short message, image and continuously repeated data. The SrUANet might be applied to wireless networks for multiple underwater robots.

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

♦ First Author : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), zoazoa@kriso.re.kr, 정희원

° Corresponding Author : KRISO, ycchoi@kriso.re.kr, 정희원

* KRISO, sgkim@kriso.re.kr, 종신회원; smkim@kriso.re.kr, 정회원; poetwon@kriso.re.kr, 정회원

논문번호 : 202110-291-D-RU, Received October 19, 2021; Revised November 16, 2021; Accepted November 18, 2021

I. 서 론

해양으로의 관심이 증대되고, 해양정보통신의 발달로 수중에서도 여러 노드들 간 네트워크 기술을 적용하여, 수중 탐사로봇간 협업 활동, 심해 해저 플랜트 모니터링, 수중 협동 구난작업 통신, 해저 자원개발, 수중관측기지 운용 등과 같은 다양한 어플리케이션이 가능하다¹⁻². 이와 같은 수중어플리케이션이 구현되기 위해서는 수중 네트워크의 고유한 특성이 고려되어야 한다. 수중 네트워크는 일반적으로 음향신호를 이용한 음파통신을 하며, 음파는 통신거리에 따른 주파수 사용 제약으로 통신 주파수 대역이 수 kHz~수백 kHz 정도로 매우 협소한 대역폭을 사용하며 이에 따라 데이터 전달속도가 매우 느리다. 또한 수중에서 음파의 속도는 약 1500 m/s로 육상의 RF통신에 비해 20만 배 느린 긴 전파지연시간을 가진다. 이외에도 높은 패킷 손실률, 배터리 사용에 따른 교체의 어려움 등과 같은 육상 무선 네트워크 보다 열악한 제약 조건을 지닌다¹⁻⁶. 이와 같은 수중 음파 환경의 특성과 응용 분야를 고려한 수중 음향 네트워크 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다⁷⁻¹⁸.

특히, 근거리 수중 음향 네트워크 관련하여 통신 거리가 200 m에서 100 kbps 통신이 가능한 수중음향통신 모델을 개발하였으며, 관련 수중채널특성 분석, 수중 채널을 모사한 근거리 수중 채널 시뮬레이터 개발, 근거리 수중 음향 네트워크 프로토콜 등의 연구가 진행되었다.

본 논문에서는 근거리 수중 음향 네트워크 (Short-range Underwater Acoustic Network: SrUANet)를 위한 네트워크 프로토콜이 포함된 운영 소프트웨어와 통합 응용프로그램인 GUI와 물리계층 통신시스템과 상위계층인 네트워크 소프트웨어를 연동시키는 인터페이스를 구현한 것에 대해 설명한다. 또한, 구현된 근거리 수중 음향 네트워크 기술의 가용성 확인을 위해, 물리계층 에뮬레이터를 적용한 네트워크 프로토콜 기능을 검증한다. 근거리 수중 채널 시뮬레이터를 적용하여 토폴로지에 따른 네트워크 형성, 제어 및 메시지 전달 기능 등의 시험을 수행하여 네트워크 기능을 검증하고, 실험역에서 근거리 수중 음향 네트워크 응용프로그램 기능인 단문 메시지 송수신, 이미지 데이터 송수신, 연속 데이터 송수신 기능 등을 확인하여 근거리 수중 음향 네트워크의 가용성을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 근거리 수중 음향 네트워크 구조와 네트워크 프로토콜에

대해 간략히 요약한다. 제 3장에서는 근거리 수중 음향 네트워크 구현 결과에 대해 설명한다. 제 4장에서는 근거리 수중 음향 네트워크 시험 방법과 실험역 실험 결과를 분석하며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 근거리 수중 음향 네트워크 개요

본 장에서는 구현하고자 하는 근거리 수중 음향 네트워크의 구조와 특성을 기술하고, 근거리 수중 음향 네트워크 프로토콜 기술에 대해 간략히 논하도록 한다.

2.1 근거리 수중 음향 네트워크 구조

근거리 수중 음향 네트워크는 그림 1과 같이 클러스터 기반 네트워크로 클러스터 헤더인 싱크 노드 (Sink Node: SN) 1대와 여러 개의 수중 노드 (Underwater Node: UN)들로 구성된다. 수중 노드들은 싱크노드와 단일 홉 통신이 가능한 범위 내에 존재하는 것으로 가정한다. SN과 UN은 자율무인잠수정 (Autonomous Underwater Vehicle: AUV)과 같이 수중에서 자유로이 움직이는 이동 노드이다. SN은 주기적으로 비콘을 방송하여 UN에게 전송 스케줄 정보를 제공하고, 수중작업에 필요한 제어 메시지를 전송한다. UN은 비콘을 수신하면 수중에서 취득한 정보와 UN의 상태/사용자 데이터(항법 정보)를 수신한 전송 스케줄에 따라 SN에 전송한다.

근거리 수중 음향 네트워크의 통신 채널은 단일채널이며 전방향 센서를 이용하고, 반이중 통신방식을 갖는다. 근거리 수중 음향 네트워크에서 고려되는 모델 사양은 최대 전송거리가 200 m 이상, 100 kbps 의 전송속도를 갖는다.

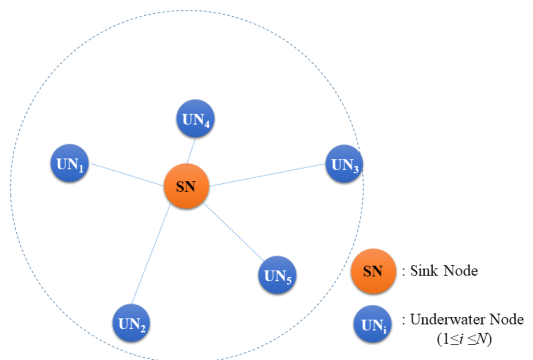


그림 1. 근거리 수중 음향 네트워크 토폴로지
Fig. 1. Topology of SrUANet.

2.2 근거리 수중 음향 네트워크 프로토콜

구현된 근거리 수중 음향 네트워크 프로토콜은 중앙집중 방식의 시분할 다중접속 (Time Division Multiple Access: TDMA) 매체접속제어를 적용한다. 수중에서는 매우 느린 전파로 인해 각 노드 당 패킷 전송을 위해 할당되는 시간 슬롯의 일부가 중복적으로 겹치더라도 육상과 달리 충돌을 회피할 수 있다^[19]. 이러한 특성을 고려하여 특정 시각에 전송 시간이 겹치지 않도록 시간 자원을 직교화하지 않고, 음파의 전달 시간과 패킷 길이를 고려하여 특정 노드에서 수신 충돌이 발생하지 않으면서 특정 시각에 중복 송신이 가능하도록 하여 채널 효율을 향상시킬 수 있는 스케줄링 방식^[17]을 적용한다.

구현된 프로토콜의 초기화 과정을 통해 SN과 UN 간 왕복전파지연시간 (Round Trip Time: RTT) 정보를 획득하게 된다. SN은 RTT 정보 유무에 기반하여 노드 간 충돌을 회피하면서 유휴시간을 최소화하는 전송 스케줄링을 계산하여 정규과정에서 비콘을 통해 방송한다. 비콘을 수신한 UN들은 스케줄에 따라 자신의 데이터 패킷을 전송하고, SN은 UN의 데이터 패킷을 수신하면서 각 UN의 RTT를 갱신하고 스케줄링을 계산하여 다음 정규과정에서 갱신된 스케줄링 정보를 방송한다.

III. 근거리 수중 음향 네트워크 구현

본 장에서는 근거리 수중 음향 네트워크를 위해 구현한 응용 소프트웨어 구조와 이를 운용하기 위한 사용자 GUI, 물리 계층 연동을 위한 인터페이스에 대해 소개한다.

3.1 근거리 수중 음향 네트워크 응용 소프트웨어 구조

그림 2는 근거리 수중 음향 네트워크 응용 소프트웨어 구조로 근거리 수중 음향 네트워크 프로토콜 및 네트워크 상위계층의 기능을 담당하는 소프트웨어와 운용 GUI (SrUANet GUI)로 구분된다.

근거리 수중 음향 네트워크 소프트웨어는 리눅스 기반의 프로그램으로 동작하며, GUI 인터페이스를 위한 소프트웨어 (GUI IF S/W), SrUANet 운용 소프트웨어 (SrUANet operating S/W), 물리계층 에뮬레이터(SrUANet PHY emulator) 등과 같이 3개의 프로그램 모듈로 구성된다.

- **GUI IF S/W:** SrUANet GUI와 TCP 서버로 통신하여 연결되며, GUI와 SrUANet operating S/W

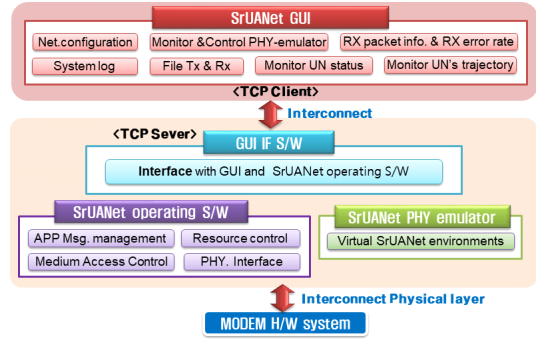


그림 2. 근거리 수중 음향 네트워크 응용 프로그램 구조
Fig. 2. The application program architecture for SrUANet

간의 정합을 위한 스위치 기능을 제공한다.

- **SrUANet PHY emulator:** UN 노드 간 수중 무선 인터페이스를 에뮬레이션 하는 프로그램으로 UN의 위치 정보를 멀티캐스팅으로 교환하고, 이에 따른 전파지연 시간을 계산하여 부여한다. 에뮬레이터 타이머를 통해 전파지연 및 패킷 전송 시간에 따라 송신 이벤트 및 수신 이벤트를 발생시킨다.
- **SrUANet operating S/W:** 근거리 수중 음향 네트워크를 위한 프로토콜 기능들을 수행하면서 1대의 SN과 여러 개의 UN으로 구성된 프로그램이 독립적으로 구동된다. 각 프로그램은 GUI IF S/W를 통해 GUI와 연동되며, 물리계층 에뮬레이터 또는 별도의 모뎀 하드웨어 장치에서 동작하는 물리계층과 정합되어 연동된다.

3.2 근거리 수중 음향 네트워크 GUI

SrUANet GUI는 윈도우 기반 프로그램으로 동작한다. 그림 3은 구현된 GUI 화면으로 (1) 네트워크 파라미터 및 구성 설정, (2) 데이터 송수신을 위한 응용 프로그램, (3)에뮬레이터에서 랜덤웨이 포인트가 적용된 UN의 이동경로 실시간 표시, (4) 수신 패킷에 대한 정보 표시 및 수신 오류율 분석, (5) 물리계층 에뮬레이터 제어, (6) 네트워크 이벤트 발생에 따른 시스템 로그 표시, (7) UN의 스케줄 정보 표시, (8) UN의 위치정보 표시, (9) 각 노드 ID에 따른 프로토콜 설정 상태 정보 표시 등의 기능을 제공한다.

3.3 근거리 수중 음향 네트워크-물리계층 정합

근거리 수중 음향 네트워크 모뎀의 주요기능은 TI사의 OMAP-L137을 이용하여 구현한다. OMAP-L137은 ARM 프로세서와 DSP 프로세서를 각각 1개씩 포함하고 있으며, 두 프로세서가 동시에 접근 가능한 공유메모리를 갖는다^[20]. SrUANet 소프트웨어

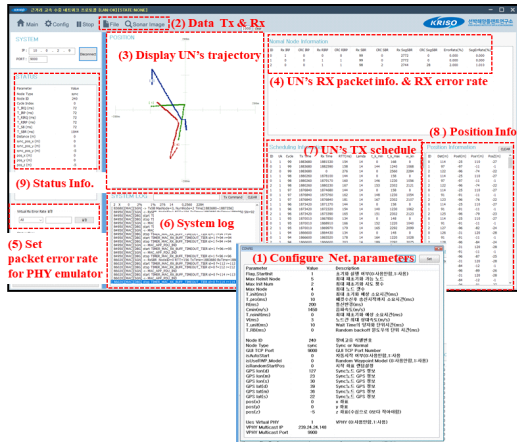


그림 3. SrUAnet GUI 화면
Fig. 3. Display of SrUAnet GUI.

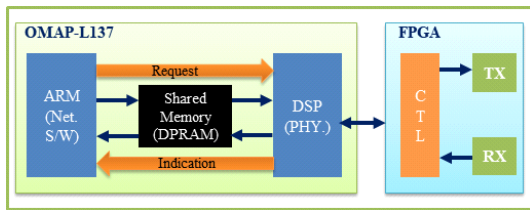


그림 4. 근거리 수중음향 네트워크-물리계층 인터페이스 구조
Fig. 4. The interface architecture between the SrUAnet S/W and PHY layer.

어는 ARM 프로세서에서 동작하며, 물리계층은 DPS 프로세서에서 독립적으로 동작하도록 구현한다. 그림 4는 SrUAnet 소프트웨어와 물리계층 간 인터페이스 구조이다. 물리계층과 네트워크 계층 간의 송수신 데이터와 제어 메시지 교환을 위해 두 개의 프로세서에서 공통으로 접근 가능한 공유메모리와 내부 인터럽트를 이용한다. 구체적으로, 두 개의 프로세서 중 송

표 1. 물리 계층 연동을 위한 제어 메시지
Table 1. Description of interface commands.

Command	Parameters
1 START_REQ	• Commonphy parameter
2 STOP_REQ	-
3 TX_REQ	• tx_m_time(48bit) • tx_data • phy parameters
4 RX_IND	• rx_m_time(48bit) • rx_data • phymeasurements
5 TIME_REQ	-
6 TIME_IND	• Current m_timer value

신 프로세서에서 전달하려는 데이터 또는 메시지를 공유메모리에 쓰고 내부 인터럽트를 발생하여 수신 프로세서에 이를 인지하고, 공유메모리에서 데이터를 읽어와 데이터 또는 메시지에 따라 필요한 동작을 수행한다. 메시지 종류에 따라 송신측에 응답을 보내야 하는 경우에는 수신프로세서가 송신프로세서로 역할을 바꾸어 앞에서 설명한 절차를 동일하게 수행하여 응답을 전달한다. 물리계층과 네트워크 계층 간의 정의되는 제어명령은 표 1과 같다.

IV. 근거리 수중 음향 네트워크 기능 검증

4.1 근거리 수중 음향 네트워크 실내 시험

4.1.1 물리계층 에뮬레이터 연동 시험

근거리 수중 음향 네트워크 기능 검증을 위해, 물리계층 에뮬레이터를 이용하여 수중네트워크 모사환경을 구축하여 기능검증을 수행한다. 그림 5는 근거리 수중 음향 네트워크 실내시험 환경을 나타내며, SN 1 대와 UN 3 대로 총 4 대의 노드로 구성된 싱글 홉 토폴로지이다. 에뮬레이터를 이용한 실내 시험을 통해 초기화 과정 RTT 획득기능, 정규화 과정 스케줄링 및 RTT 갱신 기능, 재초기화 기능을 검증하였으며, 각 기능별 검증방법은 아래와 같다.

- 초기화 과정 RTT 획득 기능: 초기화 과정에서 초기화 패킷 (IRQ-IRP) 교환을 통해 UN의 RTT 정보를 SN이 획득하게 되며, 이에 대한 결과를 확인한다.
- 정규 과정 스케줄링 및 RTT 갱신 기능: 정규 과정에서 SN은 UN의 RTT에 따라 송신 스케줄을 계산하여 UN의 전송 대기 시간을 결정한다. 정규 과정 패킷 (SB-SBR) 교환을 통한 스케줄링 기능과 RTT 갱신 결과를 확인한다.
- 재초기화 기능: 초기화 과정 시 패킷 충돌 또는 손실로 인한 재전송 패킷 (RIRQ-RIRP) 교환을 통해 초기화 완료과정 여부를 확인한다.

그림 6은 물리계층 에뮬레이터를 이용한 기능 검증 결과로 SrUAnet GUI 화면을 캡처한 것이다. 그림



그림 5. 물리계층 에뮬레이터를 이용한 실내 기능시험 환경
Fig. 5. The indoor test set-up using the PHY emulator.

```
[49:024649][MAC][SGN] -> TxIRQ TxTime=4304415 Broadcast IRQ
[49:024904][MAC][TMR] start_TIMER_MAC_WAIT_IRP_TIER timeout_init_time=450
[49:024968][URC][ABN] <- MAC_URC_START_RSP result=0
[49:261971][MAC][SGN] <- RxIRP ID=0 RTT=76 TxTime=16960 RxTime=17180
[49:261971][MAC][SGN] <- RxIRP ID=2 RTT=116 TxTime=16960 RxTime=17220
[49:445274][MAC][SGN] <- RxIRP ID=3 RTT=186 TxTime=17360 RxTime=17360
[49:445274][MAC][SGN] <- RxIRP ID=1 RTT=250 TxTime=17360 RxTime=17360
[49:499220][MAC][TMR] timeout_TIMER_MAC_WAIT_IRP_TIER ns=17410
[49:499285][MAC][SGN] Init Success! NumNode=0
End Initialization phase
```

(a) 초기화 과정 RTT 획득 결과
(a) The result of acquisition of RTT in the Initialization phase.

```
[54:225440][MAC][TMR] t_lineou TIER ns=21780
0-Cycle TxSBR=21780 Broadcast SB
ID UK RxTime SBR-Err SegSBR-Err RTT Landa t_kn(min,max) w_kn
0 0 18610 0% 0% 84 18 0, 102 0
2 0 19660 0% 0% 127 18 109,4832 1037
3 0 20710 0% 0% 196 18 176,2262 2048
1 0 21760 0% 0% 261 18 243,3342 3063
Wait time for TX
[54:225479][MAC][SGN] -> TxSB NumNode=3 Time[19788-26248]
[54:225665][MAC][TMR] start_TIMER_MAC_W out_sbr_time=4468
[55:225665][MAC][SGN] <- RxSBR NodeID=0 RTT=84 TxTime=21780 RxTime=22988 SIn=0 pos[-41,19,-10]
[55:225665][MAC][SGN] <- RxSBR NodeID=2 RTT=137 TxTime=21780 RxTime=24070 SIn=0 pos[-46,68,-19]
[57:290984][MAC][SGN] <- RxSBR NodeID=3 RTT=206 TxTime=21780 RxTime=25150 SIn=0 pos[-98,91,-10]
Update RTT
Receive SBR
```

(b) 정규 과정에서 송신 스케줄링 기능과 RTT 갱신 기능 결과
(b) The result of function of TX scheduling and updating RTT in the Normal phase.

```
SYSTEM LOG Tx Command CLEAR
Set TestErrorData 0.00~30.00
[44400][GUI][SGN] <- GUI_URC_START_REQ
[44400][URC][SGN] -> URC_MAC_SYSTEM_CONFIG_REQ
[44400][URC][SGN] -> URC_MAC_START_REQ
[44400][MAC][SGN] <- URC_MAC_SYSTEM_CONFIG_REQ
[44400][MAC][SGN] <- URC_MAC_START_REQ
[44400][MAC][SGN] -> TxIRQ TxTime=4311887 Broadcast IRQ
[44400][URC][ABN] <- MAC_URC_START_RSP result=0
[44400][GUI][SGN] -> APP_GUI_START_STOP
[44510][PHY][ERR] Time Conflict Packet collision!
[44510][PHY][ERR] stop_TIMER_PHY_RX_WAIT_TIMER (IRP), mid=25, dist=59, nid=1, wait_time=144700
[44700][MAC][SGN] <- RxIRP ID=2 RTT=154 TxTime=14700 RxTime=14700
[44810][MAC][SGN] -> TxRIRP TxTime=14700 Broadcast RIRQ ode=3
[44500][MAC][SGN] <- RxRIRP NodeID=0 RTT=1067 RxTime=14700 RxTime=14700
[47790][MAC][SGN] <- RxRIRP NodeID=1 RTT=100 TxTime=14700 RxTime=14700
[49850][MAC][SGN] ReInit Success! NumNode=0
End Re-Initialization phase
0-Cycle TxSB=149850 3]
ID UK RTT Delta(min,max) t_kn(min,max) w_kn
1 0 100 0, 0 0, 109 0
0 0 106 19, 14 92,1186 1061
2 0 150 31, 22 134,2283 2096
[49850][MAC][SGN] -> TxSB MaxNode=3, NumNode=3 Time[149850~153525]
[51040][MAC][SGN] <- BcSBR NodeID=1 RTT=74 TxTime=149850 RxTime=151040 SIn=0 pos[-10,10,-10]
Acquisition of RTT
```

(c) 재초기화 결과
(c) The result of re-Initialization.

그림 6. 물리계층 에뮬레이터 연동 실내시험 검증 결과
Fig. 6. The indoor test results using the PHY emulator

6(a)는 초기화 과정에서 RTT 정보를 획득한 결과를 나타낸 것이다. SN이 IRQ 브로드캐스팅하고, 이에 대한 응답으로 각 UN으로부터 IRP를 수신하여 UN의 RTT를 계산하고 초기화를 종료한다. 그림 6(b)는 정규 과정에서 스케줄링 및 RTT를 갱신하는 과정 결과를 나타낸다. 정규 과정에서 SN이 UN의 RTT에 따라 스케줄링을 결정하고, 이에 따른 송신 대기시간 정보를 SB를 통해 브로드캐스팅한다. UN으로부터 SBR 응답패킷을 수신하면, SN은 UN의 RTT 정보를 갱신한다. 그림 6(c)는 재초기화 과정에 대한 결과 화면이다. 초기화 과정 시, 패킷 충돌이 발생하여 SN이 IRQ에 대한 응답 패킷(IRP)을 수신하지 못하면 재전송 패킷인 RIRQ를 방송하고 RIRP 응답패킷을 수신하여 RTT 정보를 유연하게 획득한다.

4.1.2 채널 시뮬레이터 연동 시험

수중의 여러 환경변화에 따른 근거리 수중 음향 네트워크 기능 검증을 위해 근거리 수중 채널 시뮬레이터를 연동하여 실내시험을 수행하였다. 채널 시뮬레이터는 1 MHz의 AD/DA 9개의 다중경로를 갖는 광대역 고정 채널을 모사할 수 있으며, 전파지연 시간은 최소 200 ms부터 가능하다. 근거리 수중통신 신호처리 플랫폼은 물리계층 모델을 위한 DSP와 SrUANet 소프트웨어를 위한 ARM 프로세서가 포함되며, 증폭기와 트랜스듀서는 제외된다. 그림 7은 근거리 수중 채널 시뮬레이터를 연동한 시험 구성도와 시험환경을 나타낸다. 3 대의 수중통신 신호처리 플랫폼을 구성하여 SrUANet GUI 프로그램을 연동하고, 채널 시뮬레이터의 DAQ 모듈을 통해 각 근거리 수중 통신플랫폼의 아날로그 신호를 입력받고 채널시뮬레이터에서 디지털 신호로 변환된 아날로그 출력신호가 각 통신플랫폼의 수신신호로 입력된다. 채널시뮬레이터 연동 실내 시험을 통해 네트워크 토폴로지 변화에 따른 단문 메시지 송수신 기능, 이미지 데이터 송수신 기능, 연

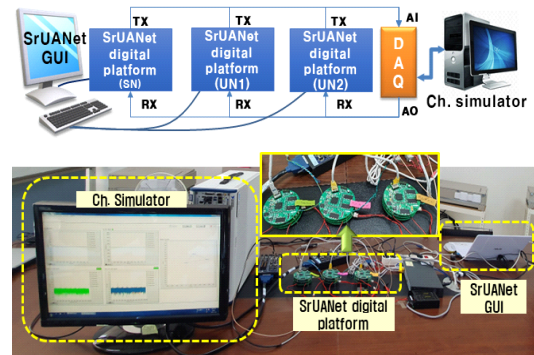


그림 7. 채널 시뮬레이터를 이용한 실내 기능시험 환경
Fig. 7. The indoor test set-up using the channel simulator.

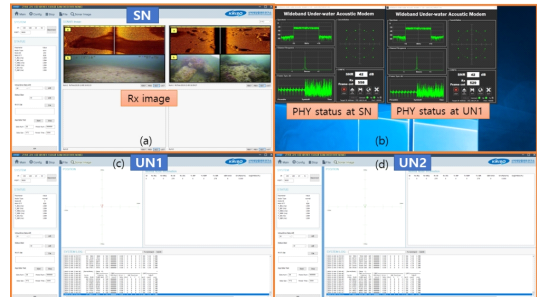


그림 8. 채널 시뮬레이터를 연동한 이미지 전송 결과
Fig. 8. The test result of image data transfer using the channel simulator.

속 데이터 자동 송수신 기능 등을 검증하였다.

그림 8은 채널 시뮬레이터를 연동하여 UN1과 UN2에서 SN으로 이미지 데이터를 전송한 결과로 SrUANet GUI에서 캡처한 것이다. 그림 8(b)는 물리 계층 채널 상태로, SN과 UN1에서의 채널상태를 나타낸다.

4.2 근거리 수중 음향 네트워크 실험역 시험

4.2.1 시험 장치 및 시험 방법

근거리 수중 음향 네트워크 실증 시험은 2019년 12월에 거제도 한국해양과학기술원 남해연구소 부근 근해에서 실험역 시험을 수행하였으며, 그림 9에서 표시된 장소와 같다.

그림 10은 근거리 수중 음향 네트워크 실험역 시험 환경으로 수중 노드 3 대로 싱크노드 SN 1대와 일반 노드인 UN0, UN1 으로 구성되며, 노드 간 통신 거리 30 cm로 최소화하여 노드들을 고정시켰다. 노드 별로 근거리 수중모뎀 센서와 수중통신 신호처리 시스템, 근거리 수중 음향 네트워크 운용 GUI를 연동하였다.

근거리 수중 음향 네트워크 실험역 실험을 통해 검



그림 9. 실험역 시험 장소
Fig. 9. The site for real-sea experiment.

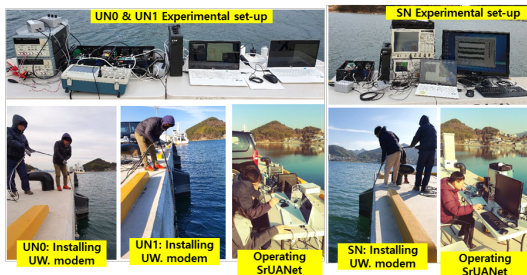


그림 10. 실험역 환경
Fig. 10. The experimental set-up.

증할 항목은 SN과 UN 간 단문 메시지 송수신, 이미지 데이터 송수신, 연속 데이터 송수신 기능이며, 다음과 같이 검증하였다.

- 단문 메시지 송수신 기능: 초기화 과정을 마치고, 정규 과정에서 UN0 UN1이 정해진 스케줄에 따라 단문 메시지를 SN에 전송하며, 이에 대한 결과를 확인한다.
- 이미지 데이터 송수신 기능: UN0과 UN1이 이미지 데이터를 전송 스케줄에 따라 전송하며, SN에서 데이터의 수신진행상황과 수신 완료된 이미지 데이터를 확인한다.
- 연속 데이터 자동 송수신 기능: UN0과 UN1이 연속 데이터를 스케줄에 따라 자동 전송 시, SN에서 수신 결과를 확인하여, UN 별 수신 패킷 수, 수신 패킷 사이즈, 채널 효율 등을 확인한다.

4.2.2 실험역 시험 결과 및 분석

그림 11은 각 노드별 물리계층에서의 수신신호 상태를 모니터링한 화면을 캡처한 것이다. 16 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 신호 성상도에서 보듯이 각 노드의 수신신호가 각각 상응하는 신호 점에 모여서 분포되어 있으며, SNR (Signal to Noise Ratio)도 28 ~ 35 dB로 노드 간 근접거리에서 물리계층 수신 신호 상태가 매우 양호하다.

그림 12는 UN0과 UN1에서 전송한 단문메시지 결과 화면과 SN에서 수신한 결과 화면을 각 노드의 SrUANet GUI에서 캡처한 것이다. UN0은 “Wonderful day!” 단문 메시지를 송신하고, 1 분 28 초 후에 SN에서 수신하는 것을 확인하였다. UN1의

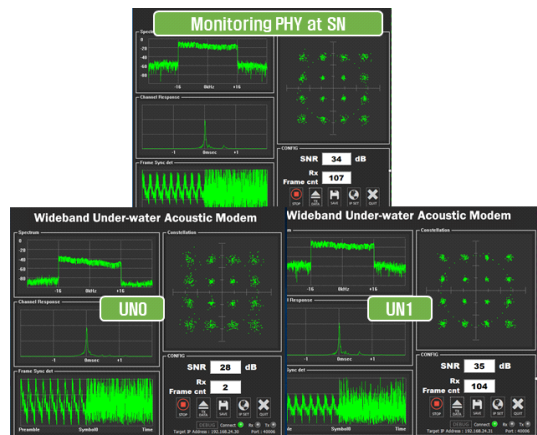


그림 11. 물리계층 수신신호 상태 모니터링 결과
Fig. 11. The result of monitoring the status of RX signals at PHY layer.

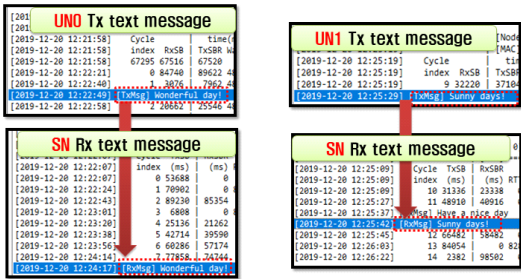


그림 12. 단문 메시지 송수신 결과
Fig. 12. The test result of transmitting and receiving text messages.

경우 “Sunny days!” 단문 메시지를 전송하고, SN이 18 초 후에 수신하였다. UN1에 비해 UN0의 메시지 전송지연이 긴 것은 UN1이 이전에 보낸 메시지에 대한 ACK를 받지 못해 여러 차례의 재전송이 이루어졌기 때문이다. 수중에서는 채널환경이 주변잡음이나 해류에 의한 센서의 위치/방향 변화와 같은 요인에 따라 실시간 변하여 통신 상태에 영향을 준다. 이를 대비하기 위해 재전송 기법을 적용하게 되는데, 이때 무분별한 재전송을 막기 위해 재전송 횟수의 제한이나 타이머를 두어 일정 시간 내에 ACK를 받지 못하면 해당 메시지 재전송을 중지하는 기법을 둔다. 본 실험에서는 수중 채널 상태에 따라 재전송 횟수를 다르게 설정할 수 있도록 하여 실험환경에 유동적으로 대처하도록 하였다.

그림 13은 UN0과 UN1에서 전송한 이미지 데이터를 SN에서 수신하고 있는 SrUANet GUI 캡처 화면과 SN에서 수신이 완료된 이미지 파일을 보여준다. UN0에서 전송된 이미지 데이터 크기는 93128 byte이며, SN에서 수신 진행률이 85 %이다. UN1에서 전송된 이미지 데이터는 크기는 90272 byte 이며 SN에서 수신 완료된 상태이다. 좌편의 2개 이미지는 UN0와 UN1에서 전송되어 SN에서 수신 완료한 이미지 파일이다.

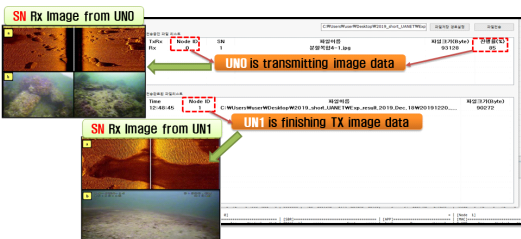


그림 13. 이미지 데이터 송수신 결과
Fig. 13. The test result of transmitting and receiving image data.

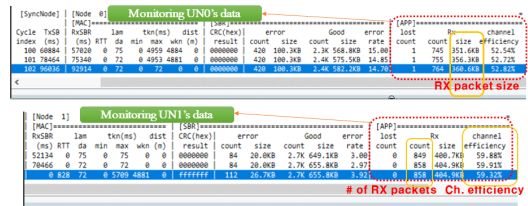


그림 14. 연속 데이터 송수신 결과
Fig. 14. Test results of continual data transmission.

그림 14는 SN에서 연속 데이터 자동 전송에 대한 데이터 수신 결과를 나타낸다. UN0와 UN1은 10초마다 231 byte 사이즈의 데이터를 생성하여 SN 노드로 전송한다. SN 노드는 수신된 데이터 사이즈와 UN0과 UN1에서 전송하는 데이터의 사이즈와 CRC (Cyclic Redundancy Check)를 통해 데이터가 성공적으로 전송되었는지 판단한다. UN0와 UN1으로부터 수신한 데이터를 모니터링한 결과로 수신한 패킷의 수와 수신한 데이터 패킷 사이즈, 채널 효율을 응용계층에서 계산하여 나타낸다. UN0과 UN1에서 수신한 데이터는 패킷 수는 각각 764 개와 858개이며, 수신 데이터 패킷 사이즈는 360.6 kbyte, 404.9 kbyte 이고, 채널 효율은 52.82 %, 59.32 %로 확인할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 근거리 수중 음향 네트워크를 위한 응용 소프트웨어와 이를 통합 운용하기 위한 GUI와 물리계층 통신 시스템과 연동하기 위한 인터페이스를 구현하였다. 또한, 실험역 실증을 통해 근거리 통신 시스템의 네트워크 기능을 검증하였다. 이를 위해, 실내시험에서 물리계층 에뮬레이터로 먼저 근거리 수중 음향 네트워크 기본 기능이 안정적으로 동작하는 것을 확인하였다. 또한, 근거리 수중 채널 시뮬레이터와 수중통신 모뎀-네트워크 플랫폼을 연동하여 토폴로지에 따른 네트워크 핵심 기능 검증을 수행하였다. 최종적으로 근거리 수중 음향 네트워크 통신시스템이 연동된 노드 3대를 근접하게 구성하여 실험역에서 네트워크 응용계층에서 기능들을 검증하였다. 그 결과로 SN-UN0-UN1 노드로 구성된 네트워크에서 단문 메시지 송수신 기능, 이미지 데이터 송수신 기능, 연속 데이터 자동 송수신 기능들이 성공적으로 동작되는 것을 확인하였다.

구현된 근거리 수중 통신 시스템과 네트워크 기술은 근거리에서 이동체간의 고속의 멀티미디어 전송이 가능한 통신체계 구축이 가능하여 수중 IoT이나 수중

통신 네트워크 기술을 포함하는 차세대 이동통신 기술인 6G에 활용 가능할 것이다. 향후, 근거리 수중 통신 시스템은 다중 홉 네트워크까지 확대 운용될 수 있도록 구현되어 기능을 검증할 예정이다.

References

- [1] J. Heidemann, M. Stojanovic, and M. Zorzi, "Underwater sensor networks: Applications, advances and challenges," *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 370, no. 1958, pp. 158-175, 2012.
- [2] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: Research challenges," *Ad hoc networks*, vol. 3, no. 3, pp. 257-279, 2005.
- [3] S. Climent, et al., "Underwater acoustic wireless sensor networks: Advances and future trends in physical, MAC and routing layers," *Sensors*, vol. 14, no. 1, pp. 795-833, 2014.
- [4] J. Partan, J. Kurose, and B. N. Levine, "A survey of practical issues in underwater networks," *ACM SIGMOBILE Mob. Comput. and Commun. Rev.*, vol. 11, no. 4, pp. 23-33, 2007.
- [5] A. R. Cho, C. Yun, S. G. Kim, Y. K. Lim, S. Seo, and Y. Choi, "Implementation of a long-range underwater acoustic network protocol," *J. KICS*, vol. 43, no. 2, pp. 397-407, 2018.
- [6] A. R. Cho, S. G. Kim, C. Yun, N. Y. Yun, and Y. Choi, "Sea-Experiment test of an underwater acoustic network for long-range communications," *J. KICS*, vol. 45, no. 4, pp. 767-774, 2020.
- [7] S. Climent, A. Sanchez, J. V. Capella, N. Meratnia, and J. J. Serrano, "Underwater acoustic wireless sensor networks: advances and future trends in physical, MAC and routing layers," *Sensors*, vol. 14, no. 1, pp. 795-833, 2014.
- [8] E. Felemban, F. K. Shaikh, U. M. Qureshi, A. A. Sheikh, and S. B. Qaisar, "Underwater sensor network applications: A comprehensive survey," *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, vol. 11, no. 11, 2015.
- [9] X. Du, K. Li, X. Liu, and Y. Su, "RLT code based handshake-free reliable MAC protocol for underwater sensor networks," *J. Sensors*, Jan. 2016.
- [10] N. Chirdchoo, W. S. Soh, and K. C. Chua, "Aloha-based MAC protocols with collision avoidance for underwater acoustic networks," *IEEE INFOCOM 2007-26th IEEE Int. Conf. Comput. Commun.*, pp. 2271-2275, Anchorage, AK, USA, 2007.
- [11] A. A. Syed, W. Ye, J. Heidemann, and B. Krishnamachari, "Understanding spatio-temporal uncertainty in medium access with ALOHA protocols," in *Proc. 2nd Wkshp. Underwater Netw.*, pp. 41-48, 2007.
- [12] S. G. Kim, S. S. Sung, N. Yun, C. Yun, and Y. K. Lim, "An implementation of signal processing platform for long-range underwater acoustic modem," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 490-491, Jeju Island, Korea, Jun. 2015.
- [13] S. H. Byun, S. M. Kim, and Y. K. Lim, "Long-range sound transmission characteristics in shallow-water channel with thermocline," *The J. Acoust. Soc. Korea*, vol. 33, no. 5, pp. 273-281, 2014.
- [14] C. Yun and Y. K. Lim, "GSR-TDMA: A geometric spatial reuse-time division multiple access MAC protocol for multihop underwater acoustic sensor networks," *J. Sensors*, vol. 2016, 2016.
- [15] Y. Choi and Y. K. Lim, "A study on a routing metric for underwater ad-hoc network," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 367-368, Jeju Island, Korea, Jun. 2015.
- [16] A. R. Cho, C. Yun, S. G. Kim, Y. K. Lim, S. Seo, and Y. Choi, "Implementation of a long-range underwater acoustic network protocol," *J. KICS*, vol. 43, no. 2, pp. 397-407, 2018.
- [17] Y. Choi, A. R. Cho, and Y. K. Lim, "A scheduling method for underwater acoustic mobile network," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 615-616, Jeju Island, Korea, Jun. 2018.
- [18] A. R. Cho, S. G. Kim, C. Yun, N. Y. Yun, and Y. Choi, "Sea-Experiment test of an un-

derwater acoustic network for long-range communications,” *J. KICS*, vol. 45, no. 4, pp. 767-774, 2020.

- [19] M. Chitre, “Throughput of networks with large propagation delays,” *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 37, no. 4, pp. 645-658, 2012.
- [20] Texas instruments, *OMAP-L137*(2021), Retrieved Oct. 10, 2021, from <https://www.ti.com/product/OMAP-L137>

조 아 라 (A-ra Cho)

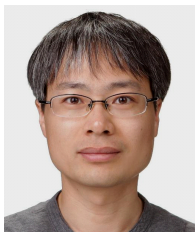


2002년 2월 : 경희대학교 전자공학과 학사
 2012년 2월 : 과학기술연합대학원대학교(UST) 해양정보통신공학과 박사
 2012년~현재 : 한국해양과학기술원 선박플랫폼 연구소 (KRISO) 선임기술원

<관심분야> 수중음향 네트워크, 해상통신 네트워크, 항만 IoT

[ORCID:0000-0001-5078-4497]

최 영 철 (Youngchol Choi)



1998년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 (공학사)
 2000년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 (공학석사)
 2011년 8월 : KAIST 전기및전자공학과 (공학박사)
 2000년 3월~현재 : 선박해양플랫폼연구소 책임연구원

<관심분야> 해양정보통신 네트워크, 수중 통신 네트워크 및 신호처리

[ORCID:0000-0002-1837-2692]

김 승 근 (Seung-Geun Kim)



1995년 2월 : 인학대학교 전자공학과 졸업
 1997년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 석사
 2002년 8월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 박사
 2002년 12월~현재 : 한국해양과

학기술원부설 선박해양플랫폼연구소 책임연구원
 <관심분야> 수중음향 통신 시스템 설계 및 구현, 동기 기술, 채널 등화기술 등

[ORCID:0000-0002-5957-4055]

김 시 문 (Sea-moon Kim)



1992년 2월 : KAIST 기계공학과 학사
 1994년 8월 : KAIST 기계공학과 석사
 2001년 2월 : KAIST 기계공학과 박사

2001년 3월~현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랫폼연구소 책임연구원
 2004년 3월~2020년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 선박해양공학과 겸임교원(부교수)

2006년 2월~2007년 2월 : Scripps Institution of Oceanography, UCSD 방문연구원(Visiting Scholar)
 <관심분야> 수중음향채널 모델링, 소나 신호처리, 수중 초음파 항법

[ORCID:0000-0002-0488-9770]

박 종 원 (Jong-Won Park)



1995년 2월 : 아주대학교 전자공학과 학사
 1997년 2월 : 아주대학교 전자공학과 석사
 2006년 2월 : 아주대학교 전자공학과 박사

1997년 3월~현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랫폼연구소 책임연구원
 <관심분야> 항만보안검색, 수중통신, 항만IoT, 선박·함정 시스템

[ORCID:0000-0003-1293-1681]